



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

ด้วยแบเรียมซัลเฟต

Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene

with Barium Sulfate

นางสุภารัตน์ รักชลธี

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



T145338

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

ด้วยแบเรียมซัลเฟต

Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene

with Barium Sulfate

นางสุภารัตน์ รักชลธิ์

EResearch

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 145338
พ.ค.เดือน.ปี 4 พ.พ. 2560

00265139

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย
จากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นด้วยแบเรียมซัลเฟต
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รักชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอม โพลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ผสมแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) ซึ่ง BaSO_4 ที่นำมาใช้มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) 1% โดยน้ำหนัก และการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสมในคอม โพลิต LLDPE/ BaSO_4 การเตรียมสูตรผสม LLDPE/ BaSO_4 ใช้ปริมาณ BaSO_4 เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ (php) และใช้ LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนักของ BaSO_4 การผสมสูตรทำได้โดยใช้เครื่องผสมระบบปิด จากนั้นนำไปขึ้นรูปชิ้นงานคอม โพลิตโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปจากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของคอม โพลิต LLDPE/ BaSO_4 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น เป็นไปตามกฎของของผสม จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า คอม โพลิตทุกสูตรผสมมีอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก อุณหภูมิในการตกผลึกใหม่ และปริมาณความเป็นผลึกของ LLDPE ใกล้เคียงกัน และการเพิ่มปริมาณ BaSO_4 ทำให้ยังมีมอดูลัส และความแข็งกดเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นเนื่องจากสภาพแวดล้อม (ESCR) พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น สำหรับการใส่ SA สามารถช่วยให้ BaSO_4 มีการแตกกระจายใน LLDPE ดีขึ้นแต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของคอม โพลิต การใช้ LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรงดึง ยังมีมอดูลัส และความแข็งกดเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง นอกจากนี้การใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ช่วยปรับปรุงสมบัติ ESCR ในคอม โพลิต LLDPE/ BaSO_4 ได้

คำสำคัญ : คอม โพลิต แบเรียมซัลเฟต พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น สารช่วยผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Property improvement of linear low density polyethylene with barium sulfate

Researcher: Mrs. Suparat Rukchonlatee

Faculty: Science

Department: Chemistry

ABSTRACT

This research studied on property improvement of linear low density polyethylene (LLDPE)/barium sulfate (BaSO_4). BaSO_4 was surface treated with 1 %wt of stearic acid (SA). Maleic anhydride grafted linear low density polyethylene (LLDPE-g-MA) was used as a compatibilizer. BaSO_4 contents were varied at 5, 10, 15, 20 and 25 parts per hundred of polymer (php) and LLDPE-g-MA was used at 1, 2 and 3 %wt of BaSO_4 . All compounds were prepared using an internal mixer and the composite samples were shaped using an injection molding process. The results revealed that the density of LLDPE/ BaSO_4 composites was increased with increasing BaSO_4 contents, following the rule of mixture. From thermal properties, the crystalline melting temperature, recrystallization temperature and %crystallinity of LLDPE in all samples were similar. From mechanical properties, the results indicated that Young's modulus and hardness were increased with increasing BaSO_4 contents but %elongation at break and impact strength of LLDPE/ BaSO_4 composites were decreased. Environmental stress cracking resistance (ESCR) of the composites increased with increasing BaSO_4 contents. Surface treatment on BaSO_4 with SA could help better dispersion of BaSO_4 ; however, mechanical properties of LLDPE/ BaSO_4 composites did not significantly changed. The incorporation of LLDPE-g-MA resulted in the increase of tensile strength, Young's modulus and hardness but the decrease in %elongation at break and impact strength of the composites. Moreover, the presence of LLDPE-g-MA compatibilizer improved the ESCR of LLDPE/ BaSO_4 composites.

Keywords : Composite, BaSO_4 , LLDPE, Compatibilizer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นด้วย
แบเรียมซัลเฟต (Property improvement of linear low density polyethylene with barium sulfate)
ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๕ (สัญญาเลขที่ 2559-
0105031) ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเมธาวิ อุตตสุรดี นักศึกษาปริญญาโท นักวิทยาศาสตร์ และ
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จ
ลุล่วงด้วยดี



นางสุภารัตน์ รักชลธิ
หัวหน้าโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คอมโพลีเมอร์	5
2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพลีเมอร์	5
2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง	5
2.1.1.2 เมทริกซ์	6
2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพลีเมอร์	6
2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง	7
2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพลีเมอร์	7
2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพลีเมอร์	8
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น	8
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE	9
2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE	9
2.2.3 การใช้งาน LLDPE	9
2.3 แบเรียมซัลเฟต	11
2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ BaSO ₄	11
2.3.2 การแบ่งประเภทของ BaSO ₄	11
2.3.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรต์	13
2.3.4 สมบัติโดยทั่วไปของ BaSO ₄	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5 การใช้งาน BaSO ₄	15
2.4 กรดสเตียริก	16
2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของกรดสเตียริก.....	16
2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ SA.....	17
2.4.3 การใช้งาน SA	17
2.5 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดราต	18
2.5.1 ความเป็นมา	18
2.5.2 กระบวนการผลิต	18
2.5.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PE-g-MA	19
2.5.4 การใช้งาน PE-g-MA	19
2.6 กระบวนการฉีดขึ้นรูป	19
2.6.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	19
2.6.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	20
2.6.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	20
2.6.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์).....	20
2.6.3.2 เวลา (ฉีด ข้ำรักษาความดันและหล่อเย็น).....	21
2.6.3.3 ความดัน (ฉีด ข้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์).....	21
2.6.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์).....	21
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	32
3.1 สารเคมี	32
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	34
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	35
3.3.1 การวิเคราะห์ BaSO ₄	35
3.3.1.1 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของ BaSO ₄	35
3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคของ BaSO ₄	35
3.3.2 การเคลือบผิว BaSO ₄ ด้วย SA 1% โดยน้ำหนัก.....	35
3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์.....	35
3.3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	36
3.3.5 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของโรงเรียนเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO ₄	39
3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดสเตียริก.....	39
3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ ในชิ้นงานตัวอย่าง	40
3.3.9 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณ ผลึก.....	41
3.3.10 การศึกษาสัณฐานวิทยาของคอม โพลีต.....	41
3.3.11 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	41
3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก.....	42
3.3.13 การทดสอบความแข็งกด	42
3.3.14 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	44
4.1 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO ₄	44
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอม โพลีต.....	44
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	45
4.1.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	45
4.1.3.1 สัณฐานวิทยาของ BaSO ₄	45
4.1.3.2 สัณฐานวิทยาของคอม โพลีต.....	47
4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอม โพลีต.....	48
4.1.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	52
4.2 การศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA.....	54
4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ BaSO ₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก.....	54
4.2.1.1 สัผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก.....	54
4.2.1.2 สัผลการตรวจสอบปริมาณกรดสเตียริก.....	55
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO ₄ และความหนาแน่นของคอม โพลีต	56
4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	57
4.2.4 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของคอม โพลีต.....	57
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอม โพลีต.....	60
4.2.6 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการวิจัย	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก - สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย	73
ประวัตินักวิจัย	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	7
2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ	8
2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ.....	9
2.4 คุณลักษณะของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532)...	13
2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับ กระบวนการตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal)..	22
2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ.....	25
2.7 สูตรผสม PP/BaSO ₄ ที่เตรียม.....	25
2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	30
3.1 สมบัติบางประการของ LDPE.....	32
3.2 สมบัติบางประการของ BaSO ₄	33
3.3 สมบัติบางประการของ LLDPE-g-MA	33
3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์.....	36
4.1 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ...	44
4.2 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน	45
4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มี ปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกันใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	53
4.4 ปริมาณของ BaSO ₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	56
4.5 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	57
4.6 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิตที่มีการใช้สารช่วย กระจายตัวและสารช่วยผสมใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE	9
2.2 ภาพขยายของ BaSO ₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	11
2.3 ภาพตัวอย่างการใช้งาน BaSO ₄	16
2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PE-g-MA.....	18
2.5 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	20
2.6 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ.....	23
2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับคอมโพสิตสูตรต่างๆ ที่ 10% โดยปริมาตรของ BaSO ₄	23
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับปริมาณ BaSO ₄ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE.....	24
2.9 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄	26
2.10 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก	27
2.11 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	28
2.12 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	28
2.13 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ.....	28
2.14 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระแทกของ PP และ PP/BaSO ₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ 24% โดยน้ำหนัก.....	29
2.15 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO ₄ ที่มี BaSO ₄ 24% โดย น้ำหนัก.....	30
3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น.....	38
3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR.....	43
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับปริมาณ BaSO ₄	45
4.2 สันฐานวิทยาของ BaSO ₄ และการกระจายตัวของขนาด.....	46
4.3 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	47
4.4 Stress-strain curve ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	49
4.5 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	50
4.6 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.7 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพลีต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีปริมาณ BaSO ₄ แตกต่างกัน.....	52
4.8 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	54
4.9 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR	55
4.10 การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง LLDPE และ BaSO ₄ เมื่อมีการใช้ SA หรือ LL-g-MA	
4.11 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า).....	58
4.12 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพลีต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสม.....	61
4.13 ความแข็งกดของคอมโพลีต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม	62
4.14 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพลีต LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม.....	63
4.15 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของ LLDPE/BaSO ₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า).....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันนี้พอลิเมอร์เป็นที่รู้จักกันดีเพราะได้รับความนิยมและมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิเมอร์กันอย่างแพร่หลาย พอลิเมอร์มีบทบาทต่อชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมหลายๆ ด้าน ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์มีความแข็งแรง ทนทาน สามารถผลิต คัดแปลง แปรรูปได้ง่าย นอกจากนี้ค่าความถ่วงจำเพาะถือเป็นจุดเด่นของวัสดุพอลิเมอร์ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น ๆ เช่น โลหะหรือเซรามิกส์ ทำให้วัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติจำเพาะ (Specific properties) หรือ สมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to weight/density) สูง จากสมบัติดังกล่าวทำให้สินค้าที่ผลิตจาก พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้งานบางกรณีที่ต้องการวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูง เพื่อนำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก ซึ่งพอลิเมอร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาพอลิเมอร์มาผสมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น สารเติมแต่ง (Additive) หรือสารตัวเติม (Filler) ซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะสูงกว่าพอลิเมอร์ ทำให้สามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักหรือความหนาแน่นของวัสดุ ทำให้วัสดุมีสมบัติเหมาะสมกับงานที่ต้องการนำไปใช้

วัสดุที่นำมาผสมในพอลิเมอร์เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้ได้ตามความต้องการของงานที่จะใช้ วัสดุที่นำมาผสมเรียกว่า สารเติมแต่ง การใช้สารเติมแต่งไม่เพียงแต่สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุเท่านั้น สารเติมแต่งบางชนิดสามารถช่วยปรับปรุงความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (Environmental stress cracking resistance, ESCR) ให้ดีขึ้น [1] และในบางครั้งสารเติมแต่งอาจนำมาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์ลง ซึ่งส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบลดลง สารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปแทนที่พอลิเมอร์เพื่อลดต้นทุนการผลิต และประหยัดการใช้ปริมาณพอลิเมอร์ เรียกว่า สารตัวเติม อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมมีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้ เนื่องจากการเติมสารตัวเติมในปริมาณมาก ส่งผลให้สารตัวเติมมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ไม่ดี และถ้าใส่สารตัวเติมในปริมาณมากเกินไปจนกระทั่งพอลิเมอร์เมตริกซ์มีไม่มากพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวประสานสารตัวเติม จะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลลดต่ำลง นอกจากนี้การเติมสารตัวเติมยังมีข้อจำกัดในเรื่องความแตกต่างระหว่างขั้วพอลิเมอร์เมตริกซ์ และสารตัวเติม ในกรณีที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วมาก ทำให้ใส่สารตัวเติมได้ในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงต้องใช้สารตัวเติมในปริมาณที่เหมาะสม หรือต้องใช้สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เช่น กรดสเตียริกมาเคลือบอนุภาคของสารตัวเติมเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น [2] นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้สารเติมแต่งประเภทอื่นๆ เพิ่ม เช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อช่วยให้สารตัวเติมและพอลิเมอร์ เกิดการผสมที่ดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ที่มีสารตัวเติมเป็นองค์ประกอบ โดยพอลิเมอร์ที่ใช้ในการศึกษา คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low density polyethylene, LLDPE) เนื่องจากในปัจจุบัน LLDPE เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ และใช้กันอย่างแพร่หลาย ลักษณะการใช้งานของ LLDPE ส่วนใหญ่ นิยมใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์ม หรือแผ่นพลาสติก เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติเด่นคือ มีความสามารถในการทนต่อแรงดึงได้มาก ทำให้สามารถผลิตฟิล์มที่มีความบางโดยไม่เกิดการฉีกขาด มีความทนทานต่อการเจาะทะลุสูง เนื่องจากการมีผลึกในโครงสร้าง [3] นอกจากนี้ LLDPE นิยมใช้ในงานที่ต้องการความเหนียว หรืองานที่ต้องการสมบัติการรับแรงกระแทก เช่น ใช้ในการผลิตขวดพลาสติก และภาชนะบรรจุของอื่นๆ เช่น เคมีภัณฑ์ สารชำระล้าง ใช้ทำของใช้ในครัวเรือน ผลิตภัณฑ์ด้านการกีฬาและของเล่นเด็ก นอกจากการใช้งานดังกล่าวข้างต้นแล้ว ในปัจจุบัน LLDPE นิยมนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ในการประมงทางทะเลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสมบัติในเรื่องความแข็งแรงคงทน และมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้สามารถทนต่อแรงกดที่เกิดจากน้ำหนักหรือแรงดันน้ำในปริมาณมากๆ ได้ดี และ LLDPE ไม่ปล่อยสารพิษออกมาแม้โดนความร้อนสูง ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น บ่อเก็บน้ำ กระชังสำหรับเพาะเลี้ยงปลา เป็นต้น แต่การใช้งานเป็นระยะเวลานานในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก หรือการใช้งานในสภาวะที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีต่างๆ ทำให้วัสดุเกิดการเสียหายเนื่องจากความเค้นทางสภาพแวดล้อม (Environmental stress cracking, ESC) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีความเค้นภายนอก (External stress) กระทำกับพอลิเมอร์ซึ่งสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ได้แก่ ของเหลวหรือไอ ก่อให้เกิดการเสียหายก่อนเวลาอันควร (Premature failure) [4]

สำหรับสารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัย คือ แบเรียมซัลเฟต (Barium Sulfate, $BaSO_4$) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีราคาถูก สามารถใช้ลดต้นทุนในการผลิตได้ $BaSO_4$ มีสมบัติเด่น คือ เป็นสารที่มีพื้นผิวที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี สามารถทนต่อสภาวะความเป็นกรดต่างได้ดี และนอกจากนี้ $BaSO_4$ มีความหนาแน่นสูงมาก (ประมาณ 4.5 g/cm^3) [5] ดังนั้นจึงนิยมใช้ผสมกับยางหรือพอลิเมอร์เพื่อปรับความหนาแน่นของเมตริกซ์ ซึ่งสมบัติดังกล่าวทำให้ $BaSO_4$ นิยมใช้เป็นสารตัวเติมที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนัก เช่น เป็นสารตัวเติมในกระชังเพาะเลี้ยงปลา นอกจากนี้ $BaSO_4$ สามารถป้องกันการแทรกผ่านของรังสีเอกซ์ (X-ray shielding) และรังสีแกมมา (Gamma shielding) ทำให้มีการใช้เป็นสารตัวเติมในการทำฉนวนกันรังสี (Radiation shielding) เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสี เช่น ใช้ผลิตแผ่นเส้นใยป้องกันรังสีเอกซ์ จากเส้นใยนาโนคอมโพสิตโดยใช้พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) พบว่าการเติม $BaSO_4$ สามารถทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพในการลดทอนรังสีที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกัน

เอกสารถนอัตรารังสีทั้งปฐมภูมิและหตุยภูมิในงานรังสีวินิจฉัย [6] หรือใช้ในผสมในคอนกรีตเพื่อผลิต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผนังสำหรับป้องกันรังสีสำหรับใช้ในโรงงานปฏิกรณ์ปรมาณูหรือในห้องทดลองที่มีเครื่องเอกซเรย์

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wang, K. [2, 7] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ที่เตรียมจากพอลิพรอพิลีน (Polypropylene, PP) โดยใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 (0-24% โดยน้ำหนัก) ทำให้ค่า Young's modulus และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ของคอมโพลีเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติม BaSO_4 ในปริมาณที่มาก (24% โดยน้ำหนัก) ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกระจายตัวไม่ดี จึงมีการนำกรดสเตียริก (Stearic acid, SA) มาเคลือบอนุภาคของ BaSO_4 เพื่อให้ BaSO_4 มีการกระจายตัวใน PP คอมโพลีเมอร์ดีขึ้น ช่วยให้ความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ Young's modulus มีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสมพอลิพรอพิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polypropylene, PP-g-MA) จากผลการทดลองพบว่าการใช้ PP-g-MA ทำให้ค่า Young's modulus ของวัสดุเพิ่มขึ้น และสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคได้

จากงานวิจัยของ Bianchi, F. [8] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพลีเมอร์ที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โดยใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม และศึกษาผลของสารปรับปรุงพื้นผิวชนิดต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า การเติม BaSO_4 ทำให้ค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) และ Young's modulus มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และพบว่าการใช้ BaSO_4 ที่เคลือบผิวด้วยกรดไขมันทำให้ Yield stress และ Young's modulus ของ HDPE คอมโพลีเมอร์มีค่าลดลงเล็กน้อย ในขณะที่มีค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมคอมโพลีเมอร์จาก LLDPE ที่มีการใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO_4 และมีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA และสารช่วยผสม LLDPE-g-MA เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมโพลีเมอร์ LLDPE/ BaSO_4 ให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อเตรียมคอมโพลีเมอร์ LLDPE/ BaSO_4 ที่มีความแข็งแรงโดยศึกษาผลของสารเติมแต่ง BaSO_4 ศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว กรดสเตียริก (SA) สารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (LLDPE-g-MA)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมสูตรผสม LLDPE/ BaSO_4 โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณ BaSO_4 ให้เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 php (Part per hundred of polymer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วยกรดสเตียริก 1% โดยน้ำหนัก เพื่อเตรียมสูตรผสม LLDPE/BaSO₄ โดยใช้ BaSO₄ ในปริมาณ 25 php และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ BaSO₄ ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก โดยใช้ Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFTS-FTIR)

3. เตรียมสูตรผสม LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักของ BaSO₄ โดยใช้ BaSO₄ ในปริมาณ 25 php

4. ขึ้นรูปชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป

5. ศึกษาความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้ Density kit

6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) และเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA)

7. ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM)

8. ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Izod impact tester

9. ศึกษาความแข็งด้วยเครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester)

10. ศึกษาสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตที่ขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

11. ศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของชิ้นงานคอมโพสิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถขึ้นรูปคอมโพสิต และทราบถึงปริมาณของ LLDPE, BaSO₄, SA หรือ LLDPE-g-MA ที่ทำให้ได้คอมโพสิตที่มีความหนาแน่นสูง และสมบัติเชิงกลที่ดี

2. เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่ผลิตพอลิเมอร์ที่ต้องการความถ่วงจำเพาะสูงหรือผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่นำไปใช้ในงานถ่วงน้ำหนัก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คอมโพสิต [9]

คอมโพสิต (Composite) หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วยองค์ประกอบสองส่วน (หรือมากกว่า) ที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (Distinct components) อยู่ด้วยกัน และมีสมบัติแตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อผสมเป็นคอมโพสิตแล้วจะมีความแข็งแรงมากกว่าแต่ละองค์ประกอบย่อย วัสดุคอมโพสิตชนิดพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติที่ดีหลายประการ ที่สำคัญที่สุด คือ มีความแข็งแรงสูง แต่มีน้ำหนักเบา เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ ปัจจุบันจึงมีการใช้งานวัสดุคอมโพสิตเป็นโครงสร้างและรับแรงสำหรับงานวิศวกรรม เช่น ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องบิน รถยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ นอกจากนี้คอมโพสิตยังมีสมบัติที่หลากหลาย เนื่องจากมีคอมโพสิตหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัสดุคอมโพสิต ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทได้

2.1.1 องค์ประกอบหลักของคอมโพสิต

คอมโพสิตประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ

2.1.1.1 ส่วนเสริมแรง

ส่วนเสริมแรง (Reinforced part) คือ ส่วนที่เป็นโครงสร้างที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมโพสิต หมายถึง เป็นส่วนรับแรงหลักของวัสดุคอมโพสิต วัสดุที่เป็นส่วนเสริมแรงจะมีความแข็งแรงและมอดูลัสสูง โดยที่ลักษณะของส่วนเสริมแรงมีหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ส่วนเสริมแรงแบบแผ่น แบบเป็นก้อน หรือผงที่มีขนาดเล็ก แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ส่วนเสริมแรงแบบเส้นใย (Fiber) ชนิดต่างๆ นอกจากเส้นใยแล้ว ในปัจจุบันนิยมใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงที่มีขนาดเล็กเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคขนาดนาโนเมตร (Nanoparticles) เนื่องจากเมื่อเติมลงไปในวัสดุจะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีค่ามอดูลัส และความแข็งแรงสูง และมีสมบัติทางแสง (Optical property) ที่ดี ไม่กระเจิงแสง ทำให้สามารถนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความใสได้ นอกจากนี้การใช้ส่วนเสริมแรงแบบผงจะทำให้วัสดุมีสมบัติในทุกทิศทางเหมือนกัน หรือ Isotropic property ซึ่งแตกต่างจากการใช้เส้นใย ซึ่งมักจะมีความแข็งแรงตามแนวเส้นใยมากกว่าตามขวางเส้นใย

2.1.1.2 เมตริกซ์

เมตริกซ์ (Matrix) คือ ส่วนที่ยึดส่วนเสริมแรงเข้าด้วยกันให้อยู่ในตำแหน่ง และการเรียงตัวที่กำหนด มักมีความแข็งแรงและมอดูลัสน้อยกว่าส่วนเสริมแรง เมตริกซ์เป็นองค์ประกอบที่มีความต่อเนื่อง (Continuous phase) จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายเทแรงที่ได้รับ (Load transfer medium) ไปสู่ส่วนเสริมแรง นอกจากนี้เมตริกซ์ทำหน้าที่ปกป้องส่วนเสริมแรงจากการเสียดสภาพเนื่องจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น วัสดุเมตริกซ์ที่ใช้ในการผลิตวัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติหลากหลาย ซึ่งอาจแบ่งชนิดของวัสดุเมตริกซ์ได้ 3 ชนิด คือ พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิกส์ พอลิเมอร์เมตริกซ์ที่นิยมใช้ในคอมโพสิต คือ พอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซต (Thermosets) เนื่องจากใช้สารตั้งต้นน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มีความหนืดต่ำ สามารถผสมกับส่วนเสริมแรง ขึ้นรูปได้ง่าย ตัวอย่างเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins) ไวนิลเอสเทอร์ (Vinyl esters) ฟีนอลิก (Phenolics) และพอลิอิมิด (Polyimides) เริ่มจากการใช้มอนอเมอร์ (Monomers) หรือ โอลิโกเมอร์ (Oligomers) ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน ทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างร่างแหสามมิติ ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ ส่วนพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติกนิยมใช้เป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิต เนื่องจากการใช้งานบางประเภทต้องการความเหนียวหรือต้องการสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุ เช่น การผลิตกันชนรถยนต์โดยใช้ PP เสริมแรงด้วยไฟเบอร์กลาส (Fiber glass) [10] หรือใช้ทำเป็นวัสดุสำหรับตกแต่งภายในที่ต้องการความเหนียว และมีความทนทาน หรือนำไปอัดซ้อนกับวัสดุอื่นเพื่อเพิ่มความแข็งแรง [11] เป็นต้น การที่พอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสามารถขึ้นรูปได้หลายครั้ง ทำให้สามารถนำวัสดุเศษหรือของเสียจากการผลิตมาบดหรือนำผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วมาผสมกับพอลิเมอร์ใหม่ และหลอมด้วยความร้อนเพื่อขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต และเป็นหนทางหนึ่งในการช่วยลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การใช้วัสดุโลหะเป็นเมตริกซ์สำหรับคอมโพสิตนิยมใช้กับเส้นใยโลหะเป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อจำกัด คือ น้ำหนักของวัสดุสูง ตัวอย่างเมตริกซ์โลหะที่นิยมใช้ คือ อะลูมิเนียม (Aluminium) ไททาเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) และทองแดง (Copper) ซึ่งการใช้โลหะและเซรามิกส์เป็นเมตริกซ์นิยมใช้กับคอมโพสิตที่ใช้งานอุณหภูมิสูงและทนต่อสารเคมี

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนชนิดของเมตริกซ์จะทำให้ได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติแตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้เมตริกซ์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติในการประยุกต์ใช้งานเป็นสำคัญ

2.1.2 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

การแบ่งชนิดของคอมโพสิตสามารถแบ่งวัสดุคอมโพสิตได้หลายแบบ โดยเอกสารนี้สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 การแบ่งตามลักษณะของส่วนเสริมแรง

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็น เส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยยาว (Long fibers) หรือเส้นใยสั้น (Short fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Larminar composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้นหรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมตริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ หรือเป็น โครงสร้างคล้ายรังผึ้ง

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Beads) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก

2.1.2.2 การแบ่งตามลักษณะการเกิดคอมโพสิต

1. คอมโพสิตจากธรรมชาติ (Natural composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เช่น ไม้เป็นคอมโพสิตของเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนเสริมแรง โดยมีสารจากพวกลิกนิน (Lignin) เป็นเมตริกซ์ยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกัน ส่วนกระดูกและฟันเป็นคอมโพสิตของผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) อยู่ในเมตริกซ์ของสารอินทรีย์เหนียวคอลลาเจน (Collagen) เป็นต้น

2. คอมโพสิตจากการสังเคราะห์ (Synthetic composites) คือ วัสดุคอมโพสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น พลาสติกเสริมแรง วัสดุไฟเบอร์กลาส เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์คอมโพสิต [9, 12]

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ช่วยลดน้ำหนักของวัสดุ	1. วัสดุดิบและเครื่องมือในการขึ้นรูป คอมโพสิตมีราคาสูง
2. มีสมบัติต่อน้ำหนักสูง เช่น ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก	2. มีสมบัติในแนวขวางของการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรงต่ำ กรณีใช้เส้นใยเป็นส่วนเสริมแรง
3. สามารถทำให้มีสมบัติแข็งแรงเฉพาะในทิศทางที่ต้องการได้	3. มีสมบัติด้านความเหนียวต่ำ
4. มีอายุการใช้งานนาน ด้านทานการสึกกร่อน	4. มีผลเสียกับสิ่งแวดล้อมเมื่อส่วนที่เป็นเมตริกซ์สังเคราะห์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้เกิดการเสียสภาพ
5. สามารถเพิ่มหรือลดสมบัติการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การประยุกต์ใช้งานคอมโพสิต [9]

ในการประยุกต์ใช้งานวัสดุคอมโพสิต ทั้งชนิดและการออกแบบรูปร่างและโครงสร้างของคอมโพสิตสามารถประยุกต์ได้กับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) เครื่องบิน (Aircraft) ยานอวกาศ (Aerospacecraft) และอุปกรณ์กีฬา (Sporting goods) เป็นต้น การที่มีการใช้งานคอมโพสิตทดแทนวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์คอมโพสิตมีชิ้นส่วนน้อยชิ้นไม่ต้องการการประกอบมาก สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการใช้งานของคอมโพสิตในอุตสาหกรรมต่างๆ [9]

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องบิน	ประตู ปีก ใบพัด หางเสือ ตัวเครื่อง
ยานอวกาศ	กระสวยอวกาศ สถานีอวกาศ
ยานยนต์	ตัวถัง ส่วนประกอบรถยนต์ กันชน
เรือ	ตัวถังเรือ คาค้ำฟ้า
เคมี	ท่อส่งสารเคมี ถังเก็บ
อุปกรณ์ก่อสร้าง	ฝาผนัง ประตู เฟอร์นิเจอร์ โต๊ะ เก้าอี้ บันได
อุปกรณ์ไฟฟ้า	แผงวงจร ไฟฟ้า กล้องคอมพิวเตอร์

2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น [13]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) ชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของพอลิโอเลฟินส์ เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเอทิลีนอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนแบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated aliphatic hydrocarbon) พอลิเอทิลีน ผลิตขึ้นในทางการค้าครั้งแรกในปี ค.ศ. 1939 เป็นพอลิเอทิลีนที่มีกิ่งก้านสาขาชนิดความหนาแน่นต่ำ เรียกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) พอลิเอทิลีนถูกค้นพบขึ้นในครั้งแรกในปี ค.ศ. 1933 โดย Dawcett และ Gibson ที่ Imperial chemical industries Ltd., (ICI) ประเทศอังกฤษ โดยจากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีที่มีความดันสูงๆ และได้ค้นพบพอลิเอทิลีนโดยบังเอิญจากปฏิกิริยาของเอทิลีนกับเบนซัลดีไฮด์ ภายใต้ความดันบรรยากาศหลายบรรยากาศ ปัจจุบันมีการผลิตพอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับการใช้งาน พอลิเอทิลีนสามารถแบ่งตามโครงสร้างทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชนิดและสมบัติทั่วไปของพอลิเอทิลีนชนิดต่างๆ [14]

พอลิเมอร์	โครงสร้างทั่วไป	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความเป็นผลึก (%)
LDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งมาก	0.92-0.94	ประมาณ 50
LLDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อย	0.92-0.94	ประมาณ 50
HDPE	เชิงเส้นมีโซ่กิ่งน้อยมาก	0.95	ประมาณ 90

พอลิเอทิลีนจัดเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ประมาณ -130 ถึง 60°C พอลิเอทิลีนจึงมีลักษณะทั้งยืดหยุ่น และแข็งที่สภาวะปกติ สำหรับอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของพอลิเอทิลีนมีค่าประมาณ 108-133°C

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ LLDPE

LLDPE เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่มีโซ่กิ่ง แต่ต่างจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากมีจำนวนโซ่กิ่งน้อยกว่า และลักษณะของกิ่งจะสั้น LLDPE สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันร่วมระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับสายโซ่ยาวๆ ของโอลิฟิน เช่น บิวทีน (Butene) เฮกซีน (Hexene) และออกทีน (Octene) โดยใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ สมบัติของ LLDPE จะอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ LLDPE [15]

2.2.2 สมบัติโดยทั่วไปของ LLDPE

- ความต้านทานต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิต่ำ ประมาณ -40°C พลาสติก LLDPE ที่มีดัชนีการไหลเดียวกันกับ LDPE จะมีความต้านทานแรงกระแทกดีกว่า
- มีความต้านทานแรงเจาะทะลุดีกว่า LDPE ถึง 60%
- LDPE จะค่าแรงต้านการดึงต่ำกว่า LLDPE ประมาณ 50% ซึ่งถ้าผสม LLDPE ใน LDPE จะทำให้ค่าแรงต้านการดึงของถุงพลาสติกสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีความแข็งแรงของรอยเชื่อม (Seal strength) สูงกว่า LDPE มาก ซึ่งเป็นประโยชน์ การทำฟิล์มหลายชั้น
- มีความต้านทานสารเคมี (Chemical resistance) สูงกว่า LDPE เนื่องจากมีปริมาณผลึกสูงกว่า
- มีสมบัติ ESCR ที่ดี เนื่องจาก LLDPE มีโซ่กิ่งที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกับ โอลิฟิน ค่า ESCR จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีจำนวน โซ่กิ่งเพิ่มขึ้น หรือมีความยาวของโซ่กิ่งเพิ่มขึ้น [16]
- เมื่อนำ LLDPE ไปเกิดพันธะเชื่อมโยงโดยการใส่สารเคมี เช่น ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide, DCP) หรือผ่านรังสี สามารถทำให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีสมบัติ ESCR เพิ่มขึ้น [17]

2.2.3 การใช้งาน LLDPE [18]

- ฟิล์ม และชีท (Film and sheet) ในการบรรจุหีบห่อฟิล์ม และชีทจะต่างกันตรงความหนา โดยสามารถใช้ได้ทั้งในลักษณะเป็นฟิล์มเดี่ยวๆ และฟิล์มหนาหลายชั้น
- นิยมใช้ทำเป็นฟิล์มเคลือบเมทัลไลซ์ (Metalized film) โดยการนำฟิล์ม LLDPE พันเคลือบด้วยตะกั่วอะลูมิเนียมในระบบสุญญากาศ นิยมใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับช่วยยืดอายุผลิตภัณฑ์ เช่น ซองบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป และซองนมขบเคี้ยว
- ใช้ทำฟิล์มป้องกันรอยขีดข่วน (Protection film) เช่น ฟิล์มติดหน้าปัดนาฬิกา หรือติดชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- ผลิตภัณฑ์แบบเป่า (Blow molding product) เช่น ขวดบีบ
- ผลิตภัณฑ์แบบฉีด (Injection molding product) เช่น ฝาขวด ตะกร้า ภาชนะบรรจุใช้ในตู้เย็น เครื่องใช้ในบ้าน และในครัวเรือน
- ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational molding process) เช่น ถังเก็บน้ำบนดิน ถังแช่แข็ง ถังบำบัดน้ำเสีย ของเล่น กรวยจราจร เรือคายัค ของตกแต่งต่างๆ ตลอดจนถังน้ำมันเครื่องยนต์
- นำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบสายไฟและสายเคเบิล เนื่องจาก LLDPE มีสมบัติความเป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดี
- ใช้งานในทางการแพทย์ เช่น แผงบรรจุยา และสายน้ำเกลือ
- ใช้ผลิตท่อส่งน้ำชลประทาน เนื่องจาก LLDPE มีความเหนียวสูงและสามารถรับแรงดันน้ำได้ดี
- ใช้ทำบ่อพลาสติกสำหรับการเกษตร หรือการเพาะเลี้ยงสัตว์ และทำพลาสติกสำหรับปูบ่อน้ำ หรือปูหน้าดินสำหรับเก็บน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

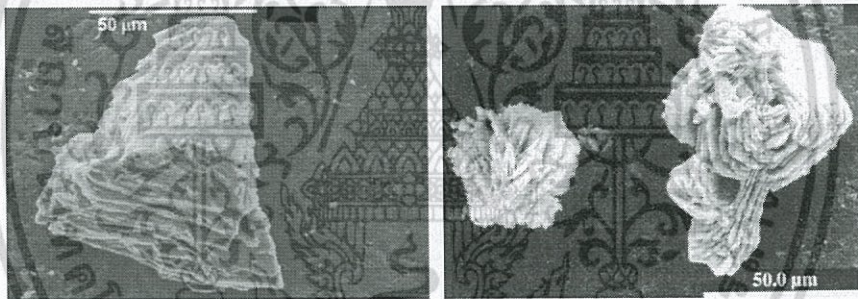
2.3 แบเรียมซัลเฟต [19]

2.3.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ BaSO₄

แบเรียมซัลเฟต (Barium sulfate, BaSO₄) มีสูตรเคมีคือ BaSO₄ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 233.34 g/mol ประกอบด้วย

	ธาตุ (%wt)		สารประกอบออกไซด์ (%wt)	
<u>Barium</u>	Ba	58.84	BaO	65.70
<u>Sulfur</u>	S	13.74	SO ₃	34.30
<u>Oxygen</u>	O	27.42		

BaSO₄ เป็นกากแร่ในสายแร่โลหะ มักเกิดร่วมกับเงิน ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ แมงกานีส และแอนติโมนี บางครั้งอาจพบเกิดเป็นสายแร่ตัดผ่านหินปูนมีแคลไซต์ปะปนหรือพบการเกิดเป็นก้อนแร่ตกค้าง (Residual messes) ในดินเหนียวที่ซ้อนอยู่บนหินปูนหรือเป็นวัตถุประสานในหินทราย



ภาพที่ 2.2 ภาพขยายของ BaSO₄ จากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด [20]

2.3.2 การแบ่งประเภทของ BaSO₄ [21-22]

แบเรียมซัลเฟตแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

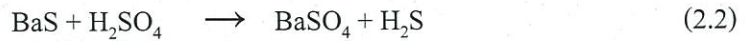
ประเภท 1 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากธรรมชาติ มี 2 ชั้นคุณภาพ คือ ชั้นคุณภาพ 1 และชั้นคุณภาพ 2

ประเภท 2 : แบเรียมซัลเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งแบเรียมซัลเฟตในเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดได้จากการนำแร่แบไรต์ (Mineral barite) ซึ่งมักจะมีสิ่งเจือปนสูงมาผ่านกระบวนการ ปฏิกริยาคารโบเทอร์มอล รีดักชัน (Carbothermal reduction : heating with coke) เพื่อให้ได้แบเรียมซัลไฟด์ (Barium sulfide, BaS) ดังแสดงในสมการที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเป็นขั้นตอนการทำปฏิกิริยากับน้ำ (Hydration) ซึ่ง BaS สามารถละลายได้ในน้ำ และถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ (Oxide) ในรูปของ คาร์บอเนต และเฮไลด์ (Halide) จากนั้นเติม H_2SO_4 เพื่อตกตะกอน $BaSO_4$ ทำให้ได้ $BaSO_4$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดย $BaSO_4$ ที่ตกตะกอนได้เรียกว่า บลังฟิกซ์ (Blanc fixe)



โดยคุณลักษณะทางฟิสิกส์และเคมีเป็นไปตามตารางที่ 2.4

การผลิตแร่แบไรต์ในประเทศมีการผลิตหลายเกรดตามความต้องการใช้ [23] ได้แก่

1. เกรดเคมี (Chemical grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต ตั้งแต่ร้อยละ 91 ขึ้นไปและมีความขาว ตั้งแต่ร้อยละ 80 ขึ้นไป
2. เกรดโคลนเจาะ (Drilling mud grade) คือ แบไรต์บดที่มีส่วนประกอบของแบเรียมซัลเฟต ต่ำกว่าร้อยละ 91 หรือมีความขาวต่ำกว่าร้อยละ 80
3. แบไรต์ก้อน (Unground grade) คือ แบไรต์ที่ได้จากธรรมชาติซึ่งส่วนใหญ่ได้มากจากการทำเหมืองแร่ดิบ และถูกจัดส่งไปยังโรงงานเพื่อลดขนาด แบไรต์ชนิดนี้มีความบริสุทธิ์ต่ำ มีสิ่งเจือปนสูง

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแบเรียมซัลเฟตสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.846-2532) [22]

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			วิธีการทดสอบตาม
		ประเภท 1		ประเภท 2	
		ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2		
1	แบเรียมซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนักไม่น้อยกว่า	95	95	97	ASTM 715
2	เกลือแบเรียมที่ละลายได้ในกรด (คำนวณเป็น แบเรียมคาร์บอเนต) ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	2.24	2.24	-	-
3	ความเป็นกรด-ด่าง ไม่น้อยกว่า	3.5	3.5	3.5	ASTM D1208
4	สารที่ละลายได้ในน้ำ ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.2	0.2	0.2	ASTM D1208
5	ความชื้นและสารที่ระเหยได้ ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.5	0.5	0.5	ASTM D280
6	ขนาด	เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย			
7	ซิลิกาอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	2.0	2.0	2.0	ASTM D7 ๓
8	การดูดกลืนน้ำมัน กรัมนต่อตัวอย่าง 100 กรัม	< 12	<12	12-14	ISO 787/5
9	ความขาวสว่าง ร้อยละไม่น้อยกว่า	85	80	95	-

2.3.3 กระบวนการแต่งแร่แบไรต์ [24]

ในกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อส่งให้กับลูกค้าซึ่งมีข้อกำหนดเกี่ยวกับสมบัติของแร่ที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การกำหนดขนาดอนุภาคแร่และการกำหนดปริมาณต่างๆ คือ $BaSO_4$, Fe_2O_3 , $SrSO_4$, SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นต้น สำหรับกระบวนการแต่งแร่แบไรต์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์มีอยู่ 3 วิธีหลักๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Hand sorting methods เป็นการคัดแยกแร่แบบไรต์ออกจากมลทินหรือกากแร่ด้วยมือ การคัดแยกแร่ด้วยวิธีนี้จะใช้กับแร่แบบไรต์ที่มีความบริสุทธิ์สูง (BaSO_4 สูงประมาณ 80-90%) และนำไปใช้ในอุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการความละเอียดสูงมากนัก เช่น นำไปใช้ในการทำโคลนผงที่ใช้ในการขุดเจาะน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น

2. Gravity methods การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้อาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะของแร่แบบไรต์เพื่อแยกแร่แบบไรต์ออกจากมลทินอื่นๆ การแต่งแร่ด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดในเรื่องของขนาดอนุภาคซึ่งควรมีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน ข้อดีของการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้คือลงทุนน้อย เสียค่าใช้จ่ายต่ำ ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับการแต่งแร่ด้วยวิธีนี้ แร่ที่มีความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะมากจะสามารถแยกตัวออกจากกันได้ดี โดยการปล่อยให้จมตัวลงผ่านตัวกลาง เช่น น้ำ หรืออากาศ อัตราการแยกตัวเนื่องจากความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะทำให้มีอัตราการแยกตัวแตกต่างกันซึ่งสามารถหาค่าพิสัยที่จะแยก (Concentration criterion) ได้ดังนี้

$$\text{Concentration criterion} = (D_n - D_f) / (D_f - D_r) \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

D_n คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่หนัก

D_f คือ ความถ่วงจำเพาะของตัวกลางที่เป็นของไหล

D_r คือ ความถ่วงจำเพาะของแร่เบา

3. Flotation methods สำหรับการแต่งแร่แบบไรต์ โดยวิธีลอยแร่เป็นวิธีการแต่งแร่ที่ทำให้ผิวแร่แบบไรต์มีสภาพไม่เปียกน้ำ (Hydrophobic) โดยการเคลือบด้วยสารหรือน้ำยาเคมี เมื่อผิวแร่แบบไรต์สัมผัสกับอากาศหรือฟองอากาศจะทำให้แร่แบบไรต์ลอยขึ้น สำหรับขั้นตอนของการลอยแร่แบบไรต์มีดังนี้

- ทำให้ผิวแร่แบบไรต์ไม่เปียกน้ำ
- ทำให้แร่แบบไรต์เกิดการกระจายตัวและเกิดฟองอากาศ
- ทำให้เกิดการแยกและกวาดเอาแร่แบบไรต์ที่ลอยได้ออก

2.3.4 สมบัติโดยทั่วไปของ BaSO_4 [19]

สี	ขาว ไม่มีสี เหลือง แดง น้ำเงินอ่อน
ความวาว	วาวแบบแก้ว – ไข่มุก
ความแข็ง	3-3.5 Mohs
ความถ่วงจำเพาะ	4.5

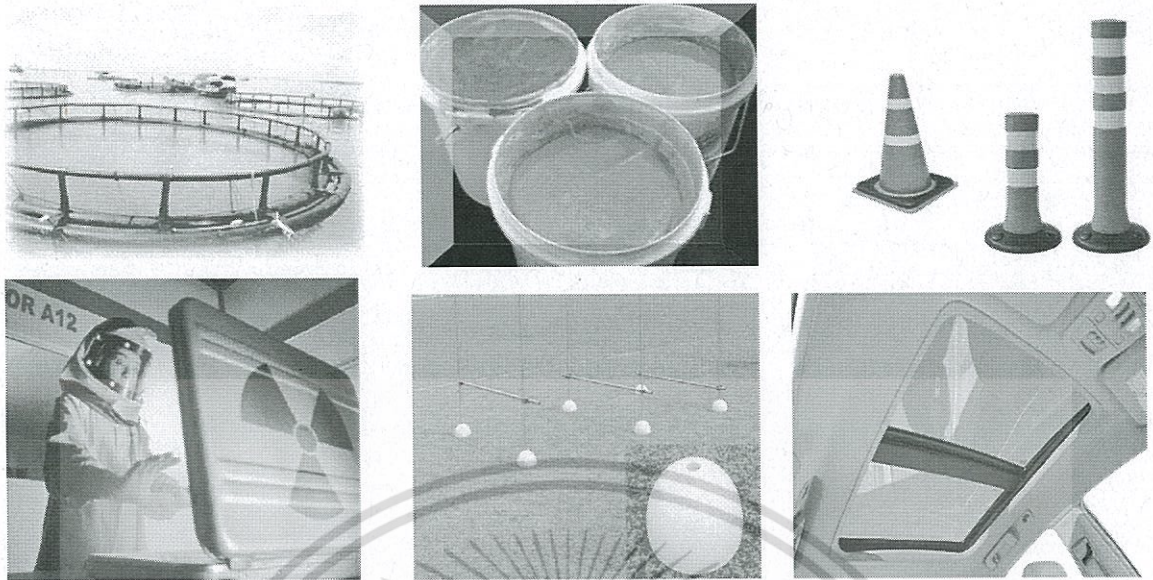
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึก	ผลึกรูปแผ่นในระนาบ (001) และผลึก รูปเพชรมักแสดงลักษณะ 1 st และ 2 nd Order prism ผลึกรูปแผ่นแบบ Crested barite หรือ Barite rose
จุดหลอมเหลว	1580°C
ค่าการละลาย (K_{sp})	1.0842×10^{-10} (25°C)
ความสามารถในการละลายในน้ำ	0.0002448 g/100 mL (20°C)
ความสามารถในการละลาย	ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ สามารถ ละลายในกรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated sulfuric acid)

2.3.5 การใช้งาน BaSO₄ [25]

- ใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพลาสติก เช่น ในงานฟิล์ม งานเป่า และงานฉีดขึ้นรูป เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อกรดต่าง
- นำไปผสมกับยางเพื่อผลิตภัณฑ์หนักสำหรับถ่วงท่อ ยางแผ่น ยางหุ้มฉนวน ยางรองฐานกรวยป้ายจราจร
- ผสมไปในพอลิเมอร์สำหรับทำฐานพลาสติกยึดเสาสำหรับแบ่งเขตแดน
- นำไปผสมใน PE เพื่อผลิตเป็นกระชังเพาะเลี้ยงปลาสำหรับใช้ในงานประมง
- นำไปผสมกับซีเมนต์เพื่อทำบรรจุภัณฑ์เก็บสารกัมมันตภาพรังสี
- ใช้ในงานเคลือบเงา เพื่อลดการแผ่รังสีจากจอคอมพิวเตอร์ และ โทรศัพท์
- นำไปผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) สำหรับทำเป็นสารเคลือบภาวาศ [26]
- ใช้ผลิตเป็นเส้นใยนาโนคอมโพสิต โดยใช้พอลิยูรีเทน (Polyurethane, PU) และพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene fluoride, PVDF) สำหรับทำอุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากรังสีในงานรังสีวินิจฉัย [6]
- ส่วนผสมของ BaSO₄ ใช้เป็นพื้นสีขาวสำหรับการผลิตสี โดยจะนำไปผสมกับซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)
- ใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความโปร่งใส (Transparent polymer) สำหรับทำเป็นกระจกด้านข้างรถ (Side windows) และกระจกหลังคารถ (Sunroof) แทนการใช้กระจก โดย BaSO₄ จะช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน และสามารถกันรังสี UV ได้บางส่วน [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เป็นส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นให้ของเหลวที่ใช้ในการผลิตบ่อน้ำมัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 ภาพตัวอย่างการใช้งาน BaSO_4 [5, 19, 25]

2.4 กรดสเตียริก

2.4.1 ลักษณะโดยทั่วไปของกรดสเตียริก [28]

กรดสเตียริก (Stearic acid, SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอน ($\text{C}_{17}\text{H}_{35}$ -) และมีปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิก (-COOH) กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอไรด์ซึ่งพบในไขมันสัตว์ และพืชหลายชนิด

กระบวนการผลิตกรดสเตียริก เริ่มจากนำไตรกลีเซอไรด์มากำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟอสฟอไรต์ โลหะหนัก สี กลิ่น โดยการล้าง (Washing) ต่อมานำไตรกลีเซอไรด์ที่ได้มาผ่านไอน้ำแรงดันสูงเพื่อแยกกรดไขมันออกจากกลีเซอริน เรียกกระบวนการนี้ว่า Splitting process กรดไขมันที่ได้นำไปผ่านการกลั่น (Distillation) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมี สี กลิ่น และเป็นการแยกกรดไขมันแต่ละชนิดออกจากกัน แบ่งเป็น 2 วิธีคือ

- Frictionation วิธีนี้ใช้กระบวนการกลั่นด้วยไอน้ำ สามารถแยกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ (C_6 - C_{14})
- Separation เนื่องจากกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (C_{16} - C_{18}) แยกออกจากกันได้ยากด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำ เพราะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงต้องใช้การแยกเชิงกายภาพ (Physical separation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สมบัติโดยทั่วไปของ SA

กรดสเตียริกมีสูตรทางเคมีคือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ [29]

- น้ำหนักโมเลกุล 284.48
- จุดเดือด 361°C
- จุดหลอมเหลว 70°C
- ความถ่วงจำเพาะ 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23°C

2.4.3 การใช้งาน SA

กรดสเตียริกนิยมใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมพาวด์ โดยกรดสเตียริกมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังช่วยให้กระบวนการผลิตเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากกรดสเตียริกเป็นสารโมเลกุลเล็กทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของยาง พอลิเมอร์ หรือพอลิเมอร์คอมพอสิต และช่วยให้การอัดขึ้นรูปหรือฉีดขึ้นรูปเป็นไปได้อย่างขึ้นด้วย นอกจากนี้เป็นส่วนประกอบหนึ่งในกระบวนการวัลคาไนเซชันยาง และใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) ในรูปของสารประกอบสเตียเรต (Sterate compound)

กรดสเตียริกนิยมใช้เติมลงไปเป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบของพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วที่มีการใช้สารตัวเติมที่มีขั้วซึ่งมักจะก่อให้เกิดปัญหาการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติม เช่นในระบบของ PE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม [30] จากงานวิจัยพบว่าการเติมกรดสเตียริกทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น โดยกรดสเตียริกจะหันด้านที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเข้าหา PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ และจะหันด้านที่เป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเข้าหา CaCO_3 ทำให้ช่วยลดการรวมตัวของอนุภาค CaCO_3 จึงช่วยให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยทำให้ระยะห่างระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติม และพอลิเมอร์เมตริกซ์ใกล้กันมากขึ้น
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดรอยแตก รอยบุ๋ม และอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งาน
4. ช่วยลดรอยขีดข่วนบนพื้นผิว

2.5 พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ [31]

2.5.1 ความเป็นมา

ในการผสมพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วกับสารตัวเติมที่มีขั้ว ความแตกต่างกันของขั้วระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปผสมเข้ากันได้ยาก การยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวทั้งสองของวัสดุไม่ดี ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลไม่ดี เพื่อจะแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการใช้สารช่วยผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม [32] โดยสารช่วยผสมที่เลือกใช้ในระบบนี้จะต้องมีส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วอยู่ในโครงสร้างเดียวกัน เช่น การใช้กราฟโคพอลิเมอร์ของมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน เช่น พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted polyethylene, PE-g-MA) [33] หรือการใช้กราฟโคพอลิเมอร์ของอะคริลิกบนสายโซ่ของพอลิเอทิลีน เช่น พอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยอะคริลิกแอซิด (Polyacrylic acid grafted polyethylene, PE-g-AA) [34] เป็นต้น

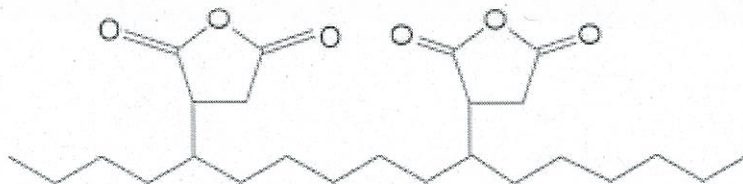
ในงานวิจัยนี้ใช้ LLDPE เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์และใช้ BaSO₄ เป็นสารตัวเติม จึงเลือก LLDPE-g-MA มาใช้เป็นสารช่วยผสม โดย LLDPE-g-MA จะช่วยลดความแตกต่างระหว่างขั้ว ทำให้ LLDPE ผสมเข้ากับ BaSO₄ ได้ดีขึ้น

2.5.2 กระบวนการผลิต

PE-g-MA สามารถผลิตได้ 3 วิธี คือ

- พอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization)
- พอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerization)
- พอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีอุลตราไวโอเลต (UV radiation)

การผลิต PE-g-MA ทำได้โดยการผสมพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เพื่อทำให้เกิดการเชื่อม โยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PE-g-MA [35]

2.5.3 สมบัติโดยทั่วไปของ PE-g-MA

- เมื่อเติมลงไปในระบบของ PE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม PE-g-MA จะช่วยเพิ่มความสามารถในการยึดติดระหว่างผิวสัมผัส ทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น
- ทำให้ PE มีความมีขี้ผึ้งเพิ่มขึ้น (Hydrophilicity)
- ทำให้ความสามารถในการเปียกดีขึ้น (Wettability)
- ทนต่อความร้อนได้ดี (Heat resistance)

2.5.4 การใช้งาน PE-g-MA

PE-g-MA นิยมนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมในระบบของพอลิเมอร์ PE กับสารตัวเติมที่มีขี้ผึ้ง เช่น CaCO_3 หรือ BaSO_4 โดยส่วนของพอลิเอทิลีนจะเข้ากันได้ดีและเกิดการเกี่ยวพันกับ PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ และในส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้งจะเข้าได้ดีกับสารตัวเติมที่มีความเป็นขี้ผึ้ง ทำให้มีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้ PE-g-MA ยังนิยมใช้ในระบบพอลิเมอร์ผสม พอลิเอไมด์ 6 (Polyamide 6, PA6)/PE โดยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MA) สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีที่แข็งแรง โดยสร้างพันธะโควาเลนต์กับหมู่ฟังก์ชันอะมิโนใน PA6 และส่วนของ PE ใน PE-g-MA จะเกิดการเกี่ยวพันกับ PE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำให้ PA6/PE มีแรงยึดติดที่ผิวสัมผัสดีขึ้น และมีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น [36]

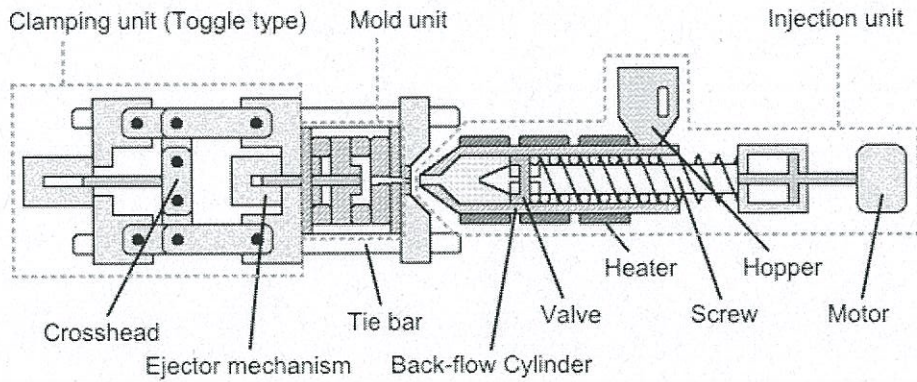
2.6 กระบวนการฉีดขึ้นรูป [37]

กระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่นิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง และสะดวกในการเปลี่ยนเม็ดพลาสติก และอิลาสโตเมอร์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน และมีรายละเอียดมากได้ ทำได้ทั้งชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและใหญ่ สามารถทำการผลิตได้ในอัตราเร็วสูง และใช้แรงงานในการควบคุมดูแลต่ำ

กระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถประยุกต์ใช้งานแปรรูปวัสดุพอลิเมอร์ได้ทุกชนิด ได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซต วัสดุประกอบอิลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์

2.6.1 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [38]

โดยทั่วไปกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วยหน่วยที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 หน่วยของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [39]

- หน่วยการฉีด (Injection unit) ทำหน้าที่ในการหลอมพลาสติก และฉีดพลาสติกที่หลอมนั้นเข้าไปสู่แม่พิมพ์
- หน่วยแม่พิมพ์ (Mold unit) เป็นบริเวณที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว และกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- หน่วยยึดแม่พิมพ์ (Clamping unit) ทำหน้าที่ทำหน้าที่เคลื่อนเปิด-ปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก และยึดแม่พิมพ์ให้ปิดสนิทขณะที่มีการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และขณะที่พลาสติกเย็นตัว

2.6.2 รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

รอบการทำงานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปประกอบด้วย 9 ขั้นตอน เริ่มต้นจากแม่พิมพ์ปิด หน่วยการฉีดเคลื่อนที่เข้ามาชิดหน่วยแม่พิมพ์ ฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ ย้ำรักษาความดัน (Hold on pressure) หล่อเย็น หลอม และป้อนพลาสติกใหม่ หน่วยการฉีดถอยหลังกลับแม่พิมพ์เปิด และปลดชิ้นงานเป็นขั้นตอนสุดท้าย

2.6.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกเพื่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ พบว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งมีอิทธิพลต่อรอบการทำงาน รวมทั้งคุณภาพของชิ้นงานขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลัก 4 ประการ คือ

2.6.3.1 อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลวและแม่พิมพ์)

อุณหภูมิของพลาสติกหลอมเหลวส่วนใหญ่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิด หรืออาจสอบถามข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต เนื่องจากเอกสารนี้ถ้าใช้อุณหภูมิในการแปรรูปค่าเกินไป อาจทำให้พลาสติกไม่ไหลเข้าหัวฉีดในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิสูงอาจทำให้พลาสติกเกิดการเสียสภาพได้ ส่วนอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่เลือกขึ้นกับชนิดของพลาสติกเช่นกัน กล่าวคือถ้าเป็นเทอร์โมพลาสติกจะใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำ แต่ถ้าเป็นเทอร์โมเซตใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง

2.6.3.2 เวลา (ฉีด ย้ำรักษาความดันและหล่อเย็น)

เวลาในการฉีดพลาสติกขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของเกลียวหนอน ส่วนเวลาในการย้ำรักษาความดัน ถ้าใช้เวลาสั้นอาจทำให้ชิ้นงานเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้เวลานานเกินไปอาจทำให้เกิดความเค้นสะสมภายในชิ้นงาน เวลาในการหล่อเย็นมีความสำคัญในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะพลาสติกที่มีความเป็นผลึก เนื่องจากถ้าเวลาในการหล่อเย็นสั้นทำให้เกิดผลึกไม่สมบูรณ์อาจทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่ดี

2.6.3.3 ความดัน (ฉีด ย้ำรักษาความดันและแม่พิมพ์)

ความดันในการฉีดพลาสติกมีผลต่อการเติมเต็มในแม่พิมพ์ ความดันย้ำคือความดันของพลาสติกหลอมเหลวที่อยู่ด้านหน้าของปลายเกลียวหนอน ซึ่งควรมีค่าเท่าใดขึ้นกับความหนืดของพลาสติก ความดันของแม่พิมพ์ คือความดันที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์เมื่อมีการฉีดพลาสติกหลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์

2.6.3.4 ความเร็ว (ฉีดและปิด-เปิดแม่พิมพ์)

ความเร็วในการฉีดเป็นตัวควบคุมความดันฉีด กล่าวคือถ้าใช้ความเร็วในการฉีดสูง ความดันฉีดจะมีค่ามากเช่นกัน ส่วนความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ไม่ค่อยมีผลต่อแม่พิมพ์ แต่จะมีผลต่อชิ้นงาน คือถ้าเปิดแม่พิมพ์เร็วเกินไป อาจทำให้ชิ้นงานถูกครูดเป็นรอย

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chen, X. และคณะ [40] ศึกษาพฤติกรรมของการหลอมเหลว และการตกผลึกของ HDPE ที่มี BaSO₄ เป็นสารตัวเติม โดยใช้ BaSO₄ เกรดนาโน ที่มีขนาดอนุภาค 40 nm และเคลือบด้วย Sodium stearate เป็นสารช่วยกระจายตัว โดยผสม HDPE กับสารตัวเติมที่ปริมาณ 1, 2, 3, 4 และ 5% โดยน้ำหนัก ซึ่งแทนด้วย HDPE1, HDPE2, HDPE3, HDPE4 และ HDPE5 ตามลำดับ ในการทดสอบ Isothermal crystallization process ได้กำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ที่อุณหภูมิ 113, 116, 119 และ 122°C

จากผลการทดลอง (แสดงในตารางที่ 2.5) พบว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ทำให้ Crystallization kinetic constant (K) เพิ่มขึ้น และใช้เวลาในการตกผลึกเพื่อให้ได้ปริมาณผลึก 50%

เอกสารนี้ (t_{1/2}) ลดน้อยลงเนื่องจาก BaSO₄ ทำหน้าที่เป็น Heterogeneous nucleating agent ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึก ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

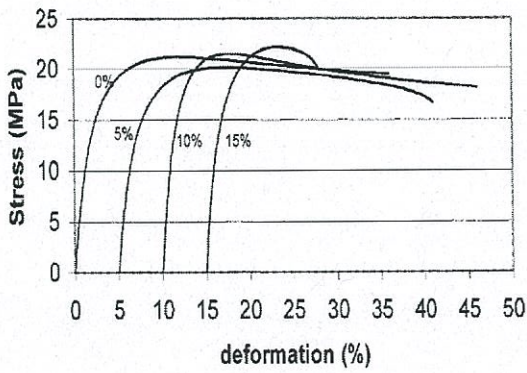
การตกผลึกใน HDPE และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ จาก 1 เป็น 2% โดยน้ำหนัก ค่า K มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และ t_{1/2} มีแนวโน้มลดลง แสดงว่า BaSO₄ ทำหน้าที่เร่งให้เกิดการตกผลึกใน HDPE ที่มีปริมาณสารตัวเติมต่ำๆ และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า การเติม BaSO₄ ที่ 1 และ 2% โดยน้ำหนัก จะทำให้อุณหภูมิในการหลอมเหลวผลึก (T_m) มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าผลึกของ HDPE มีความสมบูรณ์มากขึ้น แต่เมื่อเติม BaSO₄ 3% โดยน้ำหนัก กลับทำให้ค่า T_m ลดลง แสดงว่า HDPE มีความหนาของชั้นลามลาลดลง หรือผลึกมีความสมบูรณ์น้อยลง

ตารางที่ 2.5 ตัวแปรทางจลนศาสตร์ของ Avrami จากสมการของ Avrami สำหรับกระบวนการตกผลึกแบบกระบวนการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal) [40]

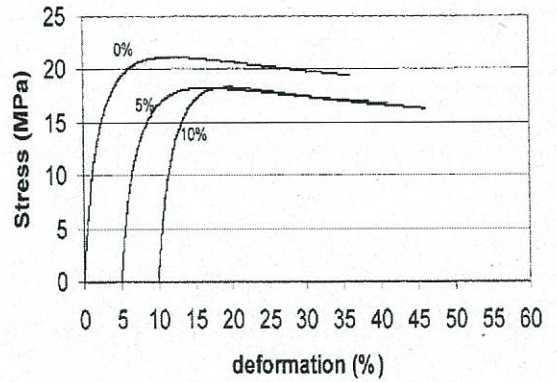
Sample	T _m (°C)	T _c (°C)	K (min)	t _{1/2} (min)
HDPE1	139.4	122	0.02	0.78
		119	1.04	0.22
		116	1.27	0.14
		113	1.54	0.11
HDPE2	149.5	122	0.09	0.70
		119	1.09	0.20
		116	1.44	0.13
		113	1.71	0.10
HDPE3	141.1	122	0.04	0.74
		119	1.05	0.21
		116	1.34	0.13
		113	1.59	0.11

Bianchi, F. และคณะ [8] ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสถานะวิทยาของ HDPE ที่มี BaSO₄ ที่มีขนาดอนุภาค 0.25 μm เป็นสารตัวเติม โดยผสม HDPE กับ BaSO₄ ในช่วง 5-15% โดยปริมาตร และศึกษาผลของ Surface agent ชนิดต่างๆ ได้แก่ Surfactant (DA), Fatty acid (AS) และ Salt of fatty acid (ST) โดยกำหนดให้ชื่อย่อ PEXXY เมื่อ XX คือชนิดของ Surface agent, YY คือปริมาณของ Surface agent เป็น % โดยน้ำหนัก และให้ 1s แทน BaSO₄ ที่ไม่ได้เคลือบด้วย Surface agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



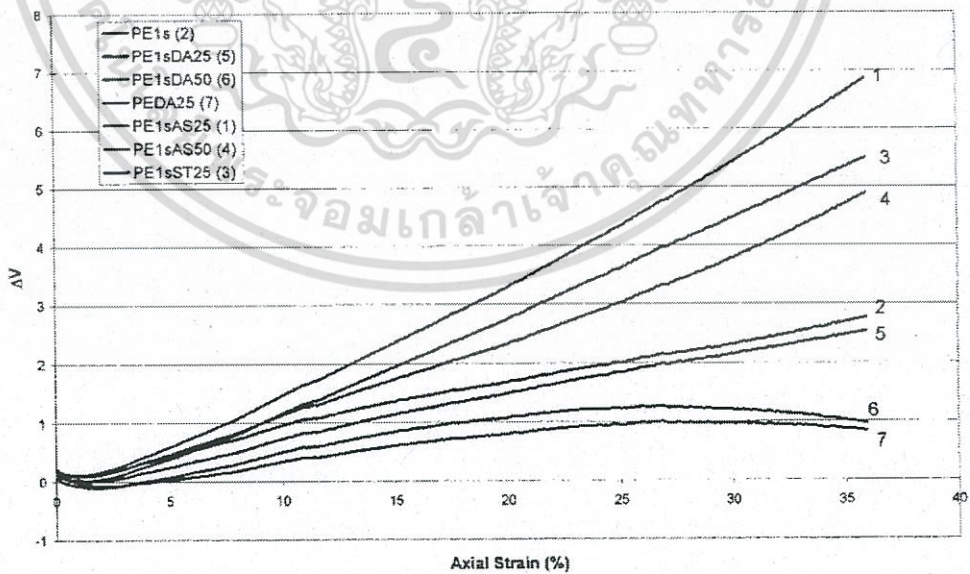
(a) PE1s



(b) PE1sAS25

ภาพที่ 2.6 Stress-Deformation ของตัวอย่างต่างๆ [8]

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.7) พบว่า PE1s เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ HDPE ที่ไม่มี การเติม BaSO₄ แต่ในสูตร PE1sAS25 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Yield stress และ Young's modulus ลดลง เนื่องจากการเคลือบอนุภาค BaSO₄ ด้วย Fatty acid ทำให้เกิดการหลุดออก (Debonding) ระหว่าง Matrix กับสารตัวเติมบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคก่อนที่จะเริ่มเกิดการเสียสภาพแบบพลาสติก (Plastic deformation)

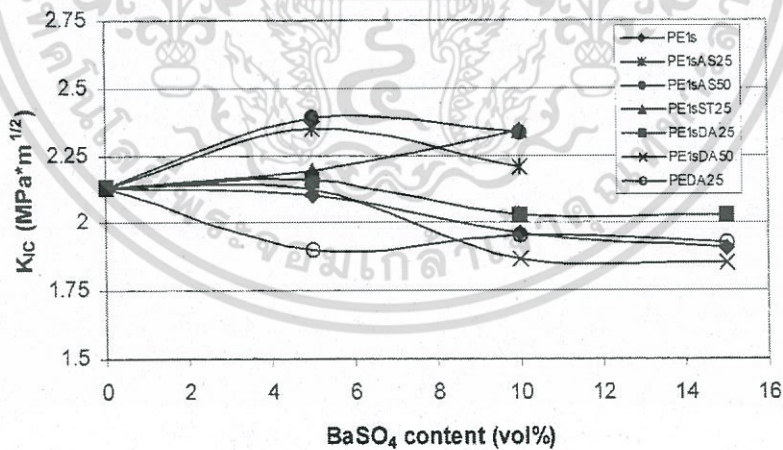


ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) กับ Axial strain สำหรับคอมโพสิตสูตรต่างๆ ที่ 10% โดยปริมาตรของ BaSO₄ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.7) พบว่า PE1sAS25 (1), PE1sST25 (3) และ PE1sAS50 (4) มีลักษณะกราฟก่อนข้างเป็นเส้นตรง คือมีการเพิ่ม Axial strain ไปพร้อมกับการเพิ่มของ ΔV แสดงว่าเมื่อตัวอย่างถูกดึงยืดจะเกิดเครซ (Craze) ขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นช่องว่าง (Microvoids) และจะมีขนาดเพิ่มขึ้น (ΔV เพิ่มขึ้น) เมื่อมีการหลุดออกกระหว่าง Matrix กับสารตัวเติม ภายในช่องว่าง ประกอบไปด้วยเส้นใยขนาดเล็ก (Microfibril) การเกิด Microfibril ทำให้วัสดุสามารถรับและกระจายแรงได้ เนื่องจากเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding

จากผลการทดสอบ Linear elastic fracture mechanism (LEFM) ดังแสดงในภาพที่ 2.8 พบว่า PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 มีค่า Fracture toughness (K_{IC}) ที่สูงกว่าการใช้ BaSO₄ ที่ไม่มีการเคลือบผิวในสูตร PE1s เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคดีกว่า ทำให้วัสดุสามารถรับและกระจายแรงได้ดีก่อนเกิดการแตกหัก และจากการศึกษาสมบัติทางความร้อนจาก DSC (ดังแสดงในตารางที่ 2.6) พบว่าตัวอย่างทุกสูตรมี T_m และ T_c ใกล้เคียงกับ HDPE แสดงว่า Surface agent ทุกชนิดไม่มีผลในการช่วยทำให้เกิดการตกผลึกของ HDPE แต่การเติม BaSO₄ มีผลทำให้ปริมาณความเป็นผลึก (X_c) ของ HDPE เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แสดงว่า BaSO₄ ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกใน HDPE และในสูตร PE1sAS25, PE1sST25 และ PE1sAS50 พบว่าการเติม BaSO₄ ลงไปใน HDPE โดยการเคลือบ BaSO₄ ด้วย Fatty acid และ Salt of fatty acid ส่งผลให้วัสดุสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง K_{IC} กับปริมาณ BaSO₄ (% โดยน้ำหนัก) ในคอมโพสิต HDPE [8]

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางความร้อนของ HDPE สูตรต่างๆ [8]

Name	T _m (°C)	ΔH _f (J/g)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	X _c
HDPE	132.5	171.9	116.2	172.9	0.58
PE1s	131.6	192.4	116.7	183.7	0.66
PE1sDA25	131.0	172.0	116.2	173.9	0.59
PE1sDA50	131.5	196.4	116.2	183.5	0.67
PE1sDA25	130.7	196.3	115.7	178.7	0.67
PE1sAS25	132.9	202.0	117.4	185.4	0.68
PE1sAS50	132.4	196.5	116.7	193.5	0.67
PE1sST25	133.2	197.5	116.3	188.8	0.67

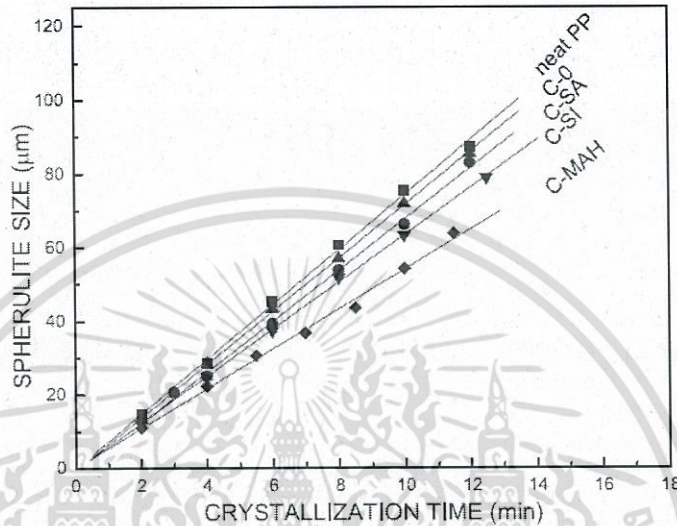
Wang, K. และคณะ [41] ศึกษาเกี่ยวกับขนาดของผลึกและอัตราการเติบโตของผลึก PP ที่มี BaSO₄ ขนาดอนุภาค 1.29 μm เป็นสารตัวเติม โดยใช้ชนิดของสารปรับปรุงพื้นผิวที่แตกต่างกัน โดยในทุกตัวอย่างจะประกอบด้วย BaSO₄ 0.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งเตรียมผ่านสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเตรียมสูตรเข้มข้นโดยใช้ PP หรือ PP-g-MA เติม BaSO₄ 80% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้งในการผสม จากนั้นนำ Virgin PP ไปผสมกับสูตรเข้มข้น โดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนตามกันในการผสม จะได้สูตรดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สูตรผสม PP/BaSO₄ ที่เตรียม [46]

Formula	Composition
C-0	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt
C-SA	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/SA 1 %wt
C-SI	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/Silane 1 %wt
C-MAH	PP/BaSO ₄ 0.5 %wt/PP-g-MA 1 %wt

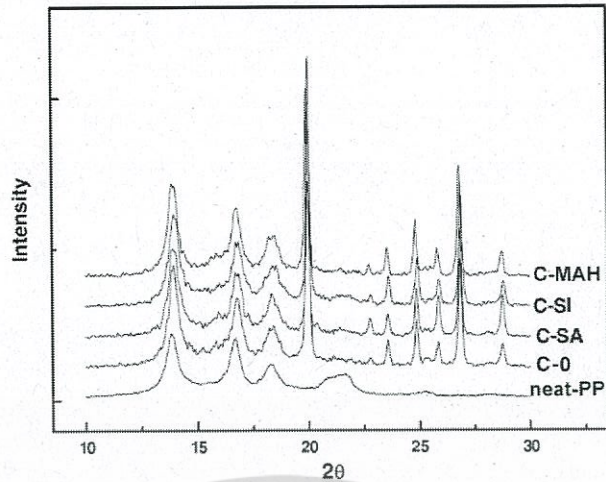
จากผลการทดลอง (ภาพที่ 2.9) พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึกสเฟียรูไลต์มีความสัมพันธ์แบบเป็นเส้นตรง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น และจะหยุดเมื่อผลึกเกิดการชนกัน ซึ่งพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก PP ทุกสูตรผสมมีค่าน้อยกว่าใน Neat PP เนื่องจากการเติม BaSO₄ ลงไปจะไปลดอัตราการเติบโตของผลึก โดยสังเกตจากความชันของกราฟที่มีค่าลดลง เนื่องจาก BaSO₄ จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ทำให้มีการจัดเรียงตัวยากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันส่งผลถึงอัตราการเกิดผลึก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ PP คือถ้าสารปรับปรุงพื้นผิวมีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคที่มีความแข็งแรงมาก จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลึกลดน้อยลง เนื่องจากบริเวณที่มีอันตรกิริยาที่แข็งแรงจะเหมือนกับการถูกเชื่อมโยงทางกายภาพ ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดเล็ก



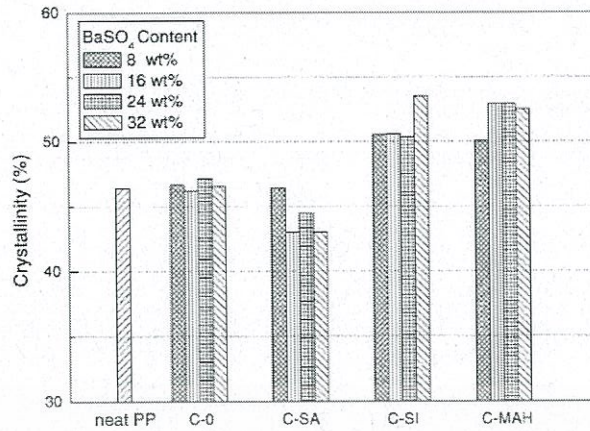
ภาพที่ 2.9 อัตราการเติบโตของผลึกสเฟียรูไลต์ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [41]

จากการศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄ [2] ในช่วง 0-32 % โดยน้ำหนัก และผลของสารช่วยผสมชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล จากผลการทดลอง Wide-angle x-ray diffraction (WAXD) (ภาพที่ 2.10) พบว่า Neat PP มีพีคผลึกแบบ α -form 3 พีค (110), (040), และ (130) ที่มีมุม 2θ เท่ากับ 13.95°, 16.90° และ 18.40° ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีความสมบูรณ์ ส่วนใน PP/BaSO₄ จะพบพีคที่ 2θ เท่ากับ 20.05° และที่มากกว่า 22.75° ซึ่งเป็นการ Reflection ที่ (300) ที่เกิดจากผลึกแบบ β -form ของ PP ซึ่งเป็นผลึกขนาดเล็กและมีความสมบูรณ์ของผลึกน้อยกว่า และพบว่าเมื่อมีอันตรกิริยาบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfacial interaction) มากจะทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กจำนวนมาก เนื่องจาก PP ที่อยู่บริเวณรอบๆ BaSO₄ จะมีการเกี่ยวพันกันบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้ความสมบูรณ์ของผลึกลดน้อยลง โดยความแข็งแรงตรงบริเวณรอยต่อของ C-MA > C-SI > C-SA > C-0

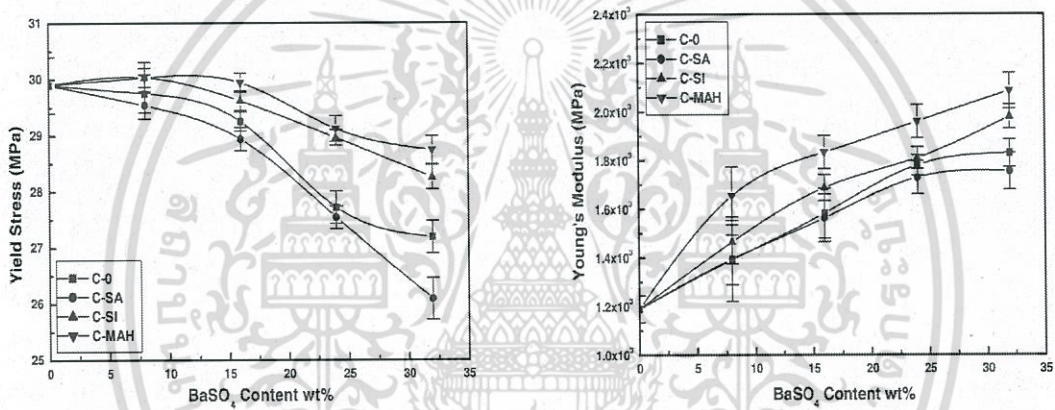


ภาพที่ 2.10 Wide angle X-ray diffractograms ของ Neat PP และ PP/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [2]

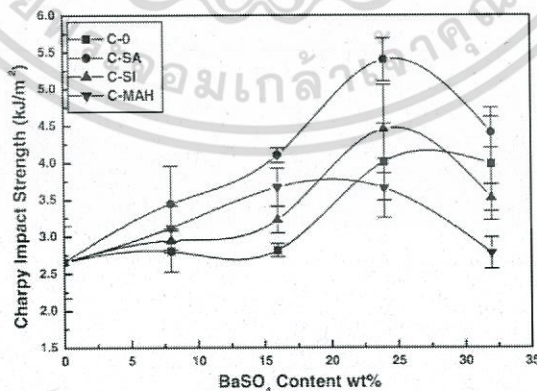
จากการศึกษาสมบัติเชิงกล (ภาพที่ 2.11-2.13) [2, 7] พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ในช่วงตั้งแต่ 16% โดยน้ำหนักเป็นต้นไป จะส่งผลให้ค่า Yield stress ลดลงเนื่องจากค่า Yield stress เกี่ยวข้องอย่างมากกับการยึดติระหว่างวัฏภาค การเติม BaSO₄ ที่มีขั้วลงใน PP ที่ไม่มีขั้ว ทำให้การยึดติระหว่างวัฏภาคไม่ดี ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงดึงยึดแล้วเกิดการเสียหายตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคได้ง่าย แต่การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ทำให้ค่า Young's modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก BaSO₄ มีความแข็งมากกว่า PP ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ สำหรับการใส่สารปรับปรุงพื้นผิวต่างชนิดกันมีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดย C-MAH และ C-SI มีค่า Yield stress และ Young's modulus ที่สูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากการยึดติระหว่างวัฏภาคที่ดี โดยหมู่ฟังก์ชันแอนไฮดรายด์ ไนมาเลอิก (Maleic anhydride, MAH) หรือหมู่ซิลานอล (Silanol) ในโซลีนสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO₄ ได้ ประกอบกับ C-MAH และ C-SI เป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกสูงกว่าสูตรอื่นๆ (ดังแสดงในตารางที่ 2.8)



ภาพที่ 2.11 ปริมาณความเป็นผลึกของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [2]



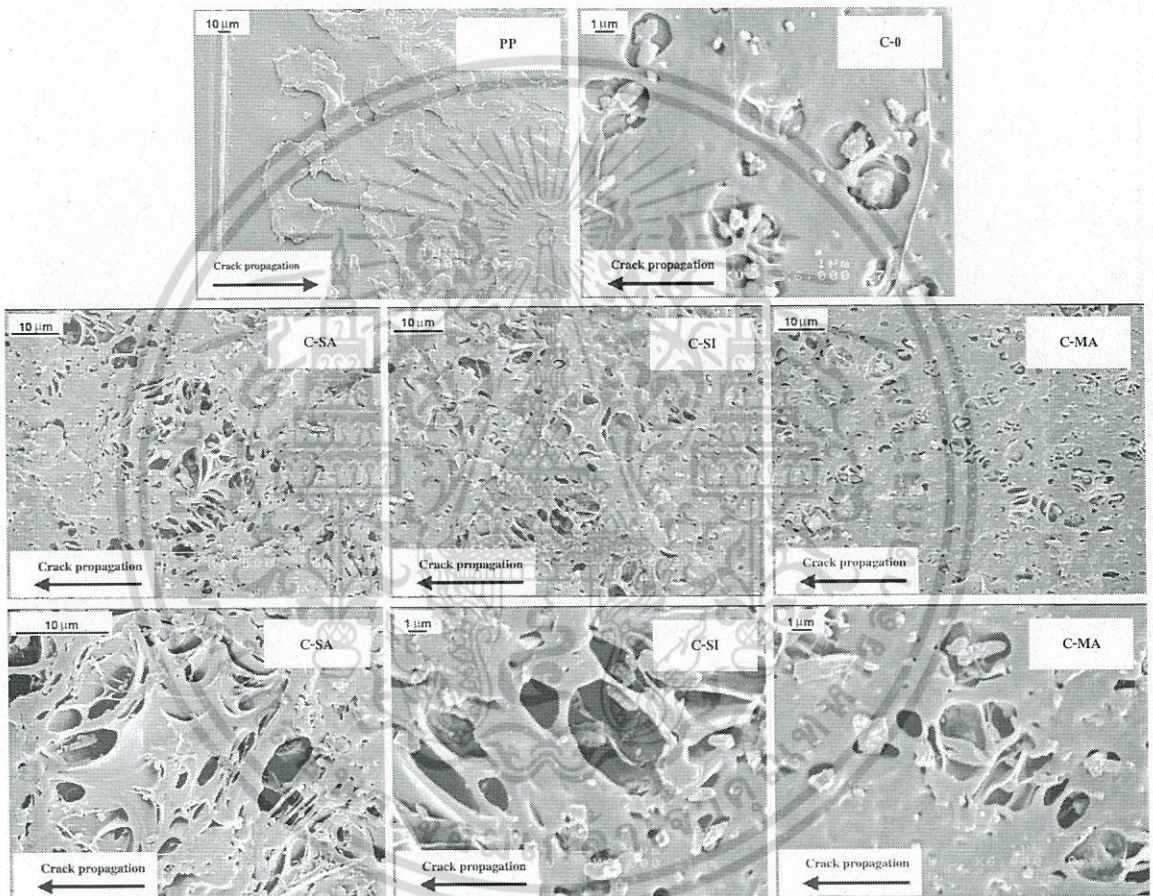
ภาพที่ 2.12 ค่า Yield stress และ Young's modulus ของ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [2]



ภาพที่ 2.13 ความแข็งแรงกระแทกแบบชาร์ปีของ Neat PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ [2]

การทดสอบความแข็งแรงกระแทกพบว่า PP/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่าความแข็งแรงกระแทกเอกสารนี้มากกว่า Neat PP เนื่องจาก Neat PP เกิดการแตกแบบเปราะ (Brittle failure) ซึ่งยืนยันได้จาก SEM ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

micrographs ในภาพที่ 2.14 ในขณะที่ PP/BaSO₄ เมื่อได้รับแรงกระทำจะเกิดครacks และเกิดการหลุดออกระหว่างพอลิเมอร์และสารตัวเติม (Debonding-cavitation) ใน PP Matrix ที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้เกิดเส้นใย (Ligament) ระหว่างช่องว่าง ซึ่งยืนยันได้จาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 เส้นใยที่เกิดขึ้นมีความหนาน้อยกว่าพอลิเมอร์บริเวณอื่น ทำให้เมื่ออยู่ภายในระนาบเดียวกันกับแรงเค้น (Plane-stress) จะชอบเกิดการเสียสภาพแบบ Shear yielding โดยจะเกิดการยืดออกของเส้นใยซึ่งสามารถกระจายพลังได้สูงก่อนเกิดการแตกหัก



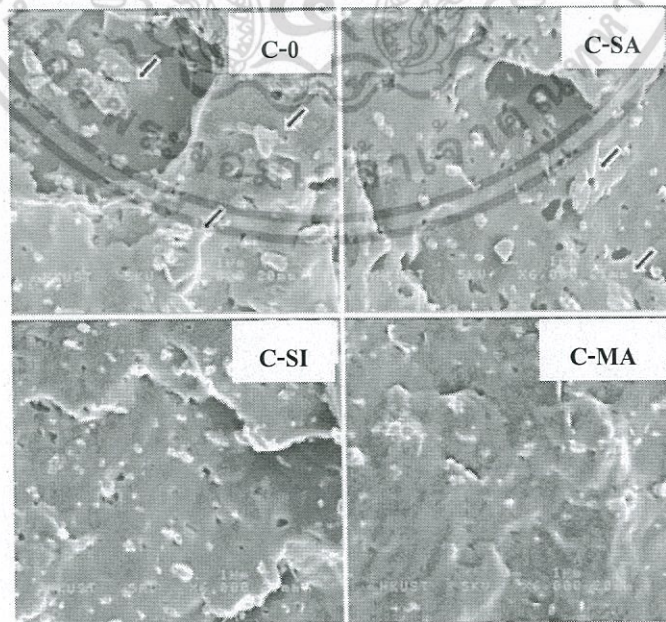
ภาพที่ 2.14 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักหลังการรับแรงกระทำของ PP และ PP/BaSO₄ สูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก [2]

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารปรับปรุงผิวต่างชนิดกันส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของวัสดุ โดย C-SA มีค่าความแข็งแรงแรงกระทำสูงกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคปานกลาง (Moderate adhesion) และเป็นสูตรที่มีความเป็นผลึกต่ำที่สุดทำให้เกิดการเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 จะเห็นว่า C-เอกสารนี้ SA มีช่องว่างที่เกิดจากการ Debonding-cavitation จำนวนมาก นอกจากนี้การใช้ SA เป็นสารช่วยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจายตัว ทำให้อุณหภูมิของ BaSO₄ มีการกระจายตัวได้ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.15 ส่งผลให้วัสดุมีความต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงกระทำที่ได้รับก่อนเกิดการเสียหาย จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ C-SA สามารถรับแรงกระทำได้สูงที่สุดในขณะที่ C-MAH และ C-SI มีการยึดติดระหว่างวัฏ-ภาคที่ดี ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.15 จะเห็นว่า BaSO₄ มีการกระจายตัวที่ดี และฝังแน่นอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ มี BaSO₄ จำนวนน้อยมากที่ถูกดึงออกมา การยึดติดระหว่างวัฏภาคที่ดี ประกอบกับความเป็นผลึกที่สูง ส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียหายได้ยากเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ Debonding-cavitation เกิดขึ้นได้ช้ากว่า C-SA ซึ่งยืนยันจาก SEM micrographs ในภาพที่ 2.14 พบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นน้อยกว่า C-SA ทำให้ C-MAH และ C-SI รับแรงกระทำได้น้อยกว่า C-SA

ตารางที่ 2.8 ความเป็นผลึก และสมบัติเชิงกลของ Neat PP และ PP/BaSO₄ [7]

Sample code	X _c (%)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Impact strength (kJ/m ²)
Neat PP	46.4	29.9	1.19	2.7
C-0	47.1	27.7	1.78	4.0
C-SA	44.5	27.5	1.73	5.4
C-SI	50.3	28.3	1.81	4.5
C-MAH	52.9	28.7	1.96	3.7



ภาพที่ 2.15 SEM micrographs แสดงพื้นผิวแตกหักของ PP/BaSO₄ ที่มี BaSO₄ 24% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติม BaSO_4 ในปริมาณที่เหมาะสมลงไปในพอลิเมอร์ สามารถเพิ่มความแข็ง และความสามารถในการรับแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิตได้ การใช้สารปรับปรุงพื้นผิว SA สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวทำให้วัสดุมีสมบัติการรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น การใช้ PE-g-MA สามารถช่วยให้เกิดการผสมที่ดี และยังสามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างผิวภาคของพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมที่มีความแตกต่างระหว่างขั้วได้ ส่งผลให้วัสดุที่ได้มีความแข็ง และมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเตรียมคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว SA หรือสารช่วยผสม PE-g-MA เพื่อศึกษาค่าความหนาแน่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และศึกษา ESCR ของวัสดุ



บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น เกรดฉีดขึ้นรูป LL8420A, บริษัท พีทีที โพลีเอทิลีน จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ LLDPE*

สมบัติ	InnoPlus LL8420A	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ครรชนีการไหล (Melt Index, 190°C, 2.16 kg)	20	g/10min	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	0.924	g/cm ³	ASTM D792
จุดหลอมเหลว (Melting point)	123	°C	ASTM D3418
จุดอ่อนตัว (Vicat softening point)	92	°C	ASTM D1525
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)	12	MPa	ASTM D638
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)	8	MPa	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดคราก (Elongation at yield)	20	%	ASTM D638
การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)	300	%	ASTM D638
มอดุลัส (1% Secant modulus)	310	MPa	ASTM D638
ความแข็ง (Hardness, shore D)	53	-	ASTM D2240
ความแข็งแรงกระแทก (Notched izod impact strength)	400	J/m	ASTM D256
ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR, 100% Igepal, F ₅₀ Bent strip test : 100% Igepal, 3.2 mm. specimen, no slit, 50°C)	150	Hours	ASTM D1693

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. แบริมซัลเฟต เกรดตกตะกอน SY 1250 (ไม่มีการเคลือบผิว), บริษัท TITANOS จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ BaSO₄*

สมบัติ	SY 1250	หน่วย
ลักษณะ (Appearance)	ผงสีขาว	-
ขนาด (Median diameter)	3.0	µm
ความหนาแน่น (Specific gravity)	4.5	g/cm ³
ค่า pH	6.5-9.0	-
ค่าคงที่การละลายน้ำ (Water soluble substances)	<0.3	%
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption)	15-30	g/cm ³
ปริมาณ BaSO ₄	>98	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต (สามารถดูเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก จ)

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (LLDPE-g-MA) เกรด SCONA TSPE 1112 GALL, บริษัท บี. วาย. เค. ซัพพลาย แอนด์ เซอร์วิส จำกัด

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ LLDPE-g-MA*

สมบัติ	SCONA TSPE 1112 GALL	หน่วย
ปริมาณมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (MA content)	2	%
ดัชนีหลอมการไหล (Melt Index, 190°C, 5 kg)	5	g/10min
Drying loss (3 h, 110°C)	0.5	%

*ข้อมูลจากบริษัทผู้จำหน่าย

4. กรดสเตียริก เกรดการค้า, บริษัท เอสเค โพลีเมอร์ จำกัด
5. โนนิลฟีนอล พอลิเอทิลีน ไกลคอล อีเทอร์ (Nonylphenol polyethylene glycol ether) เกรด Tergitol[®] NP-9, บริษัท ซิกม่า-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด
6. โทลูอิน เกรดการค้า, บริษัท แล็บซีสเต็มส์ จำกัด
7. ไนโตรเจนเหลว
8. Surfactant Pervitro 75% เกรด ARTNR ME-72409, บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer, รุ่น MX500-D75L90, Chareon Tut Co., Ltd.)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder, รุ่น 5HP, Bosco Engineering Co., Ltd.)
3. เครื่องปั๊มลม (รุ่น Bebicon 400, Hitachi Co., Ltd.,)
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection molding machine, รุ่น TTI 200/80, บริษัท
ประธานกิจการ จำกัด)
5. เครื่อง Density kit (รุ่น ML-DNY-43, Mettler-toledo Co., Ltd.)
6. เครื่อง Thermal gravimetric analyzer (TGA, รุ่น TG 209 F3 Tarsus[®], Netzsch Co.,
Ltd.)
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, รุ่น DSC 204 F1 Phoenix[®] (ASC),
Netzsch Co., Ltd.)
8. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM, รุ่น LR5K,
Lloyd Instrument Ltd.)
9. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester, รุ่น DSTFDDR, Italia Co., Ltd.)
10. เครื่องทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก (Izod impact tester, รุ่น Yasuda 199311,
Yasuda seiki seisakusho Ltd.)
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM, รุ่น
JSM-5410LV, JEOL Co., Ltd.)
12. เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonik[™] Cleaner model ; Output frequency : 44-48 KHz,
Fisher scientific worldwide Co., Ltd.)
13. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, รุ่น ISOTEMP 228, Fisher scientific Co., Ltd.)
14. ตู้อบลมร้อน (Universal oven, รุ่น ML204, Memmert (Germany) Co., Ltd.)
15. เครื่องทำรอยบาก (Ceast, รุ่น Yasuda No. 7686, Yausda seiki seisakusho Ltd.)
16. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Mastersizer χ , รุ่น MSX15, Malvern Instruments Ltd.)
17. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier transform infrared
spectroscopy, FT-IR, รุ่น FTIR Spectrum Gx, Perkin Elmer)
18. เตาเผา (Furnace, รุ่น 6000, BARNSTEAD THERMOLYNE Co., Ltd.)
19. บีกเกอร์ขนาด 100 ml, 150 ml และ 3000 ml
20. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียคาลิเปอร์
21. เดซิเตเตอร์
22. โกร่งบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 23. เครื่องซึ่งละเอียดการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

24. ตะเกียงบุนเสน
25. หลอดหยด
26. แท่งแก้วคนสาร
27. เทอร์โมมิเตอร์
28. แท่งจับยึดชิ้นงาน (ใช้ในการทดสอบ ESCR)
29. ฟอर्सิป (Forceps)
30. อลูมิเนียมฟอยล์

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์ BaSO_4

3.3.1.1 การศึกษาลักษณะวิทยาของ BaSO_4

นำตัวอย่าง BaSO_4 ไปโรยบนคาร์บอนเทป ก่อนนำไปติดบนสตัป (Stub) และเคลือบทองคำ แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ด้วย SEM

3.3.1.2 การวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาคของ BaSO_4

นำตัวอย่าง BaSO_4 ไปวิเคราะห์การกระจายของขนาดอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer χ ใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปียก (Wet analysis) มีน้ำกลั่นเป็นตัวกลาง จากนั้นนำตัวอย่าง BaSO_4 เทลงใน Recirculator ที่มีน้ำกลั่นอยู่จนถึงระดับ Obscuration ที่ประมาณ 15-30% กดปุ่มให้เครื่องทำงาน เครื่องจะทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดของอนุภาค

3.3.2 การเคลือบผิว BaSO_4 ด้วย SA 1% โดยน้ำหนัก

นำ BaSO_4 20 กรัมใส่ในบีกเกอร์แรก (ขนาด 150 ml) และใช้โหลูอินเป็นตัวกลาง ประมาณ 75 มิลลิลิตร นำไปวางในเครื่องอัลตราโซนิก โซนิเคชันเป็นเวลา 15 นาทีที่อุณหภูมิห้อง ในตู้ดูดควัน นำกรดสเตียริก 0.2 กรัมใส่ในบีกเกอร์ที่สอง (ขนาด 100 ml) ค่อยๆ ละลายด้วยโหลูอิน ประมาณ 50 ml จนกระทั่งกรดสเตียริกละลายสมบูรณ์ จากนั้นค่อยๆ หยดสารละลายกรดสเตียริกลงในบีกเกอร์ที่ 1 จนหมด โซนิเคชันต่อเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้ให้ตัวทำละลายระเหยในตู้ดูดควัน ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่งบดสาร

3.3.3 การเตรียมสูตรพอลิเมอร์

เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ โดยผสมตามอัตราส่วนดังตารางที่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3.4
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งส่วนผสม LLDPE, BaSO₄ และ LLDPE-g-MA ตามตารางที่ 3.4 โดยเตรียมสูตรละ 700 กรัม ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณสารผสมรวม 350 กรัม เขย่าเพื่อให้ผสมกัน จากนั้นนำมาเทใส่ในเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) โดยตั้งสถานะของเครื่องดังนี้

- อุณหภูมิที่ใช้ในการผสม 170 °C
- ความเร็วรอบ (Rotor speed) 60 rpm
- เวลาที่ใช้ในการผสม 30 min

นำสูตรผสมที่ผ่านการผสมแล้ว ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปบดให้มีขนาดเล็กเพื่อนำไปฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมที่เตรียมเทียบเป็นส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง (php)			
	LLDPE	BaSO ₄	SA	LLDPE-g-MA
LL	100	-	-	-
LLB5	100	5	-	-
LLB10	100	10	-	-
LLB15	100	15	-	-
LLB20	100	20	-	-
LLB25	100	25	-	-
LLB25S1	100	25	0.25	-
LLB25G1	100	25	-	0.25
LLB25G2	100	25	-	0.50
LLB25G3	100	25	-	0.75

3.3.4 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

นำพอลิเมอร์ผสมสูตรที่บดแล้วไปฉีดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) โดยตั้งสถานะของเครื่องดังนี้

อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป (°C)

- Nozzle Temp. 190
- Zone 1 Temp. 180
- Zone 2 Temp. 170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาในการฉีดขึ้นรูป (s)

1 st STG INJ	20
2 nd STG INJ	20
3 rd STG INJ	20
COOLING	300

ความเร็วในการฉีดขึ้นรูป (%)

1 st STG ING	30
2 nd STG ING	30
3 rd STG ING	30

ความดันในการฉีดขึ้นรูป (kg/cm²)

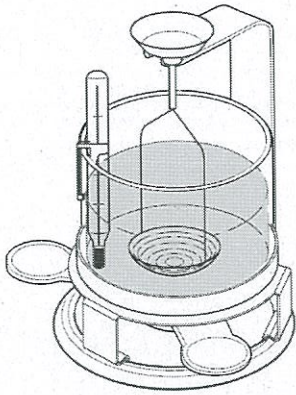
1 st INJ	30
2 nd INJ	30
3 rd INJ	30

3.3.5 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของตัวอย่าง

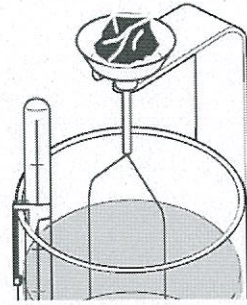
หาความหนาแน่นของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [42] ด้วยการใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ประกอบกับ Density kit ความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างจะถูกกำหนดจากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น (ρ_0) โดยในการทดลองใช้น้ำกลั่นและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 22.4°C ($\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$ at 22.4°C)

ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ [43]

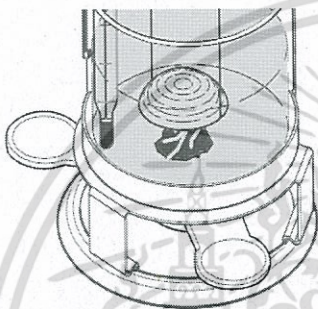
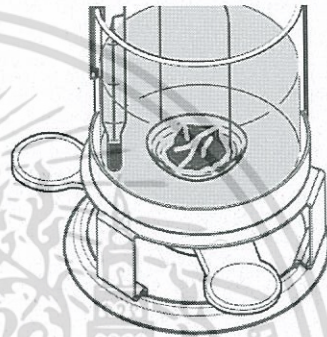
1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 3.1 (a)
3. หยด Surfactant Pervitro 75% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้เปียก (Wetting agent) ประมาณ 3 หยด ซึ่ง Wetting agent จะทำให้น้ำกลั่นแพร่ไปบนชิ้นงานตัวอย่างได้ดีขึ้น โดย Surfactant จะไปลดความตึงผิวของน้ำกลั่น
4. ก่อนทำการทดสอบต้องรองจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นคงที่
5. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานตัวอย่างบน Pan ดังแสดงในภาพที่ 3.1 (b) กดบันทึกค่าน้ำหนักที่ชั่งได้



(a) ลักษณะการจัดวางเครื่องมือ



(b) การชั่งตัวอย่างในตัวกลางอากาศ

(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งตัวอย่างที่มี ρ น้อยกว่าน้ำกลั่น(d) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งตัวอย่างที่มี ρ มากกว่าน้ำกลั่น

ภาพที่ 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น [43]

6. หลังจากนั้นชั่งชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น

6.1 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ Basket ดังภาพที่ 3.1 (c) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปใต้น้ำกลั่นโดยค่อยๆ ใช้แท่งแก้วคนดันตัวอย่างให้อยู่ภายใต้ Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก ต้องมั่นใจว่าวัสดุที่นำมาทดสอบไม่ลอยอยู่บนน้ำกลั่น และไม่มีฟองอากาศเกิดขึ้น

6.2 กรณีที่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังภาพที่ 3.1 (d) จากนั้นใส่ตัวอย่างลงไปบน Basket และกดบันทึกน้ำหนัก

7. หลังจากวัดน้ำหนักของตัวอย่างในตัวอย่างที่เป็นอากาศและในตัวอย่างที่เป็นน้ำกลั่นแล้ว กดปุ่มคำนวณ เครื่อง Density kit จะแสดงค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง

ค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง : } \rho = \frac{A (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L}{A - B} \quad (3.1)$$

$$\text{ปริมาตรของตัวอย่าง : } V = \frac{\alpha (A - B)}{(\rho_0 - \rho_L)} \quad (3.2)$$

- เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของตัวอย่าง
 A = น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ
 B = น้ำหนักของตัวอย่างที่ชั่งในของเหลว
 V = ปริมาตรของตัวอย่าง
 ρ_0 = ความหนาแน่นของของเหลวที่ทราบความหนาแน่น
 ρ_L = ความหนาแน่นของอากาศ (0.0012 g/cm^3)
 α = Weight correction factor (0.99985)

3.3.6 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4

นำ BaSO_4 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก มาตรวจวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก โดยใช้เทคนิค Diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFTS-FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}

3.3.7 การวิเคราะห์ปริมาณกรดสเตียริก

หาปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4 ด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 600°C เพื่อกำจัดกรดสเตียริกออกไป ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ตอนที่ 1 นำครุชเบิลแบบถ้วยมาเผาด้วยเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600°C หลังจากนั้นทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำครุชเบิลที่ผ่านการเผาแล้วมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) พร้อมทั้งจดบันทึกค่า โดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชเบิล

ตอนที่ 2 นำครุชเบิลที่ผ่านการเผาแล้วมาใส่ BaSO_4 ที่เคลือบด้วยกรดสเตียริก โดยให้มีน้ำหนักประมาณ 5 กรัม จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักโดยเครื่องชั่งเครื่องชั่งละเอียด พร้อมทั้งจดบันทึกค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชเบิลก่อนเผา

ตอนที่ 3 นำครุชิลิตที่มีตัวอย่างที่ผ่านการชั่งแล้วมาเผาด้วยตะเกียงเบนเสนจนกระทั่งไม่เห็นเปลวไฟในครุชิลิต จากนั้นทำการทดลองซ้ำตอนที่ 1 ค่าโดยน้ำหนักที่ได้ให้กำหนดเป็นน้ำหนักของครุชิลิตหลังเผา

ปริมาณของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4 สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

น้ำหนักสารที่เหลือ = น้ำหนักของครุชิลิตหลังเผา - น้ำหนักของครุชิลิต

น้ำหนักสารทั้งหมด = น้ำหนักของครุชิลิตก่อนเผา - น้ำหนักของครุชิลิต

$$\text{กรดสเตียริก (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักสารที่เหลือ} \times 100}{\text{น้ำหนักสารทั้งหมด}} \quad (3.3)$$

3.3.8 การวิเคราะห์ปริมาณ BaSO_4 ในชิ้นงานตัวอย่าง

นำชิ้นงานที่ได้จากเครื่องฉีดขึ้นรูปมาหาปริมาณ BaSO_4 โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 800°C เพื่อกำจัดสารอินทรีย์อื่นๆ ออกไป ภายใต้บรรยากาศของอากาศ (Air) นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาปริมาณ BaSO_4 ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D1131 [44]

3.3.9 การหาอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการตกผลึก และปริมาณผลึก

ตัวอย่างจากชิ้นงานฉีดขึ้นรูปมาศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เครื่อง DSC ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อน ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 180°C และทำให้เย็น โดยการลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิห้อง นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E794 [45]

$$\text{Heat of fusion, } \Delta H_f \text{ (J/g)} = \frac{\text{พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง } T_m \text{) (J)}}{\text{น้ำหนักสารตัวอย่าง (g)}} \quad (3.4)$$

$$\text{Heat of fusion } \Delta H_{\text{Normalised}} \text{ (J/g)} = \frac{\Delta H_f \times 100 \text{ (J/g)}}{100\% - \% \text{ โดยน้ำหนักของสารที่ไม่ใช่ PE}} \quad (3.5)$$

$$\text{ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ (\%)} = \frac{\Delta H_{\text{Normalised}} \times 100}{\Delta H_f^0} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ ΔH_f คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึก (ที่ตำแหน่ง T_m)
- ΔH_f^0 คือ พลังงานความร้อนในการหลอมผลึกของ PE ที่มีความเป็นผลึก 100% มีค่าเท่ากับ 293 J/g [46]
- $\Delta H_{\text{Normalised}}$ คือ พลังงานความร้อนในการหลอมเหลวผลึกของพอลิเอทิลีนในของผสม โดยคิดเทียบปริมาณของพอลิเอทิลีน 100% โดยน้ำหนัก

3.3.10 การศึกษาพื้นฐานวิทยาของคอมโพสิต

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำชิ้นงานส่วนพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำแล้วนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของ BaSO_4 ด้วยเครื่อง SEM

3.3.11 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

การทดสอบค่าความแข็งแรงดึง ค่ายังมอดุลัส และค่าร้อยละการดึงยืด ตามมาตรฐาน ASTM D638 [47] โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้สภาวะที่ทดสอบดังนี้

- โหลดเซลล์ (Load cell) 5 kN
- ความเร็วในการดึง (Test speed) 300 mm/min
- ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 35 mm

หมายเหตุ ใช้ความเร็วในการดึง 300 mm/min เนื่องจาก LLDPE ที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดฉีดขึ้นรูป (MFI = 20 g/10min) การทดสอบที่ความเร็วต่ำกว่านี้ พบว่าชิ้นงานไม่ขาดในระยะการยืดที่ถูกจำกัดด้วยความสูงของเครื่องมือทดสอบ

ค่าความแข็งแรงดึง, ค่ายังมอดุลัส และร้อยละการดึงยืด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield)} = F_{\text{at yield}} / A \quad (3.7)$$

$$\text{ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break)} = F_{\text{at break}} / A \quad (3.8)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield)} = \frac{(l_{\text{at yield}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.9)$$

$$\text{ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)} = \frac{(l_{\text{at break}} - l_0) \times 100}{l_0} \quad (3.10)$$

$$\text{ค่ายังมอดุลัส (Young's Modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \quad (3.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$F_{at\ yield}$	=	แรงดึงยึดขึ้นงาน ณ จุดคราก
	$F_{at\ break}$	=	แรงดึงยึดขึ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	$l_{at\ yield}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดคราก
	$l_{at\ break}$	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานหลังทำการดึงขึ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l_0	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับขึ้นงานก่อนดึงขึ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 35 mm

หมายเหตุ ค่ายังมอดูลส์คำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 0.5 และ 1% การดึงยึด)

3.3.12 การทดสอบสมบัติการรับแรงกระแทก

การทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 256 [48] โดยในการทดสอบใช้มาตรฐานแบบไอซอด (Izod type) ชิ้นงานตัวอย่าง 10 ชิ้นในแต่ละสูตร ทำการบากชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นรูปตัววี (V notch) โดยมีรัศมีร่องบาก (Root radius) 0.254 mm และมีความลึก 2.54 mm ด้วยเครื่องทำรอยบาก ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (Notched samples) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ความแข็งแรงกระแทก } (W_k) = W/A_k \quad (3.12)$$

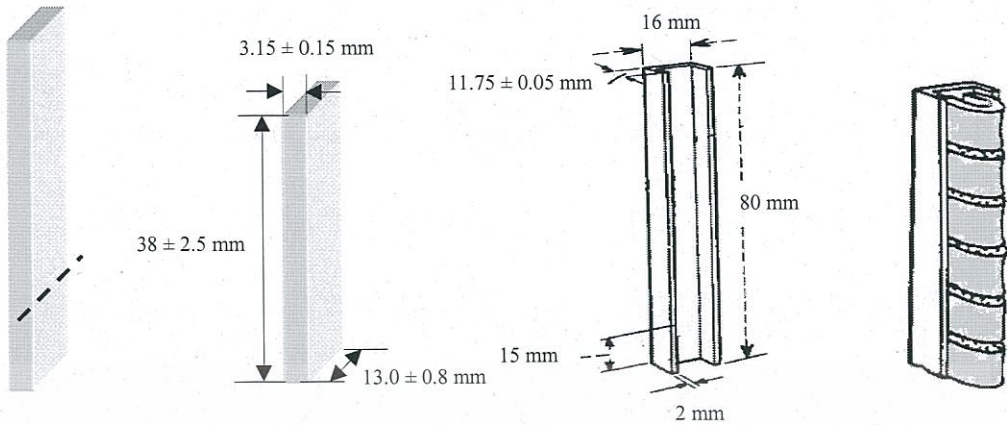
W_k	=	ค่าความแข็งแรงกระแทกของตัวอย่างที่มีรอยบาก (kJ/m^2)
W	=	ค่าพลังงานกระแทกที่วัดได้ (kJ)
A_k	=	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างที่หักรอยรอยบากแล้ว (m^2)

3.3.13 การทดสอบความแข็งกด

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูปที่มีความหนาประมาณ 3.15 mm มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้อง กดตัวอย่างเป็นเวลา 3 วินาที แล้วอ่านค่าที่วัดได้ ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [49]

3.3.14 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

นำชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป (ภาพที่ 3.2 (a)) จำนวน 10 ชิ้นต่อ 1 สูตร มาตัดปลายด้านเอกสารนี้หนึ่งออกให้มีความยาวของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 38 ± 2.5 mm ดังภาพที่ 3.2 (b) โดยใช้คัตเตอร์ การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- (a) ตัวอย่างที่ได้มาจากการฉีดขึ้นรูป (b) ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (c) แท่งจับยึดชิ้นงาน (d) ลักษณะการประกอบตัวอย่างกับแท่งจับยึดชิ้นงาน

ภาพที่ 3.2 ลักษณะและการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ESCR [50]

จากนั้นค่อยๆ งดชิ้นงานตัวอย่าง และนำไปใส่ในแท่งจับยึดชิ้นงาน ดังภาพที่ 3.2 (c) แช่ตัวอย่างในบีกเกอร์ขนาด 3000 ml ที่มี 100% Nonylphenol polyethylene glycol ether ปริมาณ 700 ml บรรจุอยู่ จากนั้นนำภาชนะไปใส่ในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่าง และจดบันทึกเวลาเมื่อสังเกตเห็นรอยแตกเกิดขึ้นในตัวอย่าง เพื่อนำไปหาค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [51] โดยรายงานค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม F_{50} คือ เวลาที่มีตัวอย่าง 5 ชิ้นเกิดรอยแตกขึ้น

หลังจากที่ตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการแตกหัก ให้นำตัวอย่างไปศึกษาลักษณะการเสียหายของชิ้นงานบริเวณภาคตัดขวางโดยใช้เทคนิค SEM

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การศึกษาผลของปริมาณ BaSO₄

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO₄ และความหนาแน่นของคอมโพสิต

ปริมาณที่แท้จริงของ BaSO₄ ในคอมโพสิตตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4. เนื่องจาก BaSO₄ มีการฟุ้งกระจาย ในขั้นตอนการผสมจึงเติม BaSO₄ โดยเผื่อปริมาณมากกว่าประมาณ 1 กรัม ของปริมาณ BaSO₄ ที่ต้องการ พบว่าปริมาณ BaSO₄ ในคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ เนื่องจากเป็นการผสมในระบบปิดโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด

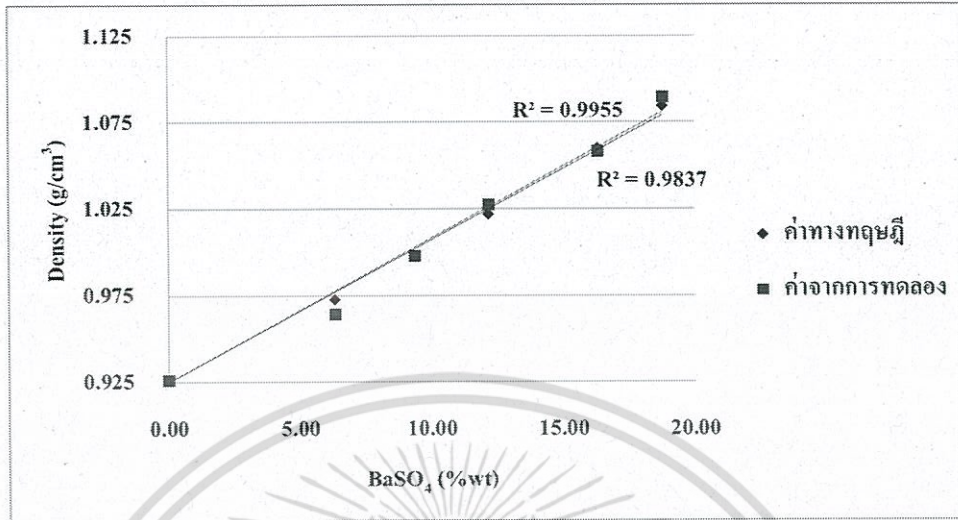
ตารางที่ 4.1 ปริมาณของ BaSO₄ และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO ₄ ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO ₄ ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
LL	-	-	-	-	0.926±0.001	0.924
LLB5	5	4.76	6.68	6.36	0.964±0.001	0.973
LLB10	10	9.09	10.33	9.39	0.998±0.000	0.999
LLB15	15	13.04	14.03	12.20	1.027±0.001	1.023
LLB20	20	16.67	19.61	16.34	1.058±0.000	1.062
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090±0.002	1.086

ค่าความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมโพสิตที่หาได้จากเครื่อง Density kit และความหนาแน่นทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข) แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความหนาแน่นของแต่ละสูตรผสมในทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลของการเติม BaSO₄ ซึ่งมีความหนาแน่น (4.5 g/cm³) สูงกว่าความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm³) ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO₄ เป็น 5, 10, 15, 20 และ 25 php ให้ค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนของวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงกว่าลงใน LLDPE ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของวัสดุเพิ่มขึ้น

เมื่อนำค่าความหนาแน่นไปสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น (g/cm³) กับปริมาณ BaSO₄ (%wt) ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงว่าความหนาแน่นที่เพิ่มมากขึ้นเป็นไปตามกฎของการผสม (Rule of mixture)



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับปริมาณ BaSO₄

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.2 พบว่าคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ทุกสูตรมีค่า T_m และความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน และมีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE แสดงว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ผลึกที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาจากค่า T_c พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า BaSO₄ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ LLDPE ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chen, X. [41] ซึ่งพบว่า BaSO₄ สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกได้ใน HDPE อาจเนื่องจากใช้ BaSO₄ เกรดนาโน (ขนาดอนุภาค 40 nm) ซึ่งแตกต่างจากขนาดของ BaSO₄ (4.64 μm) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพลีเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LLB5	130.6	107.3	35
LLB10	129.6	107.9	33
LLB15	127.6	109.7	33
LLB20	127.7	109.0	34
LLB25	128.4	108.9	34

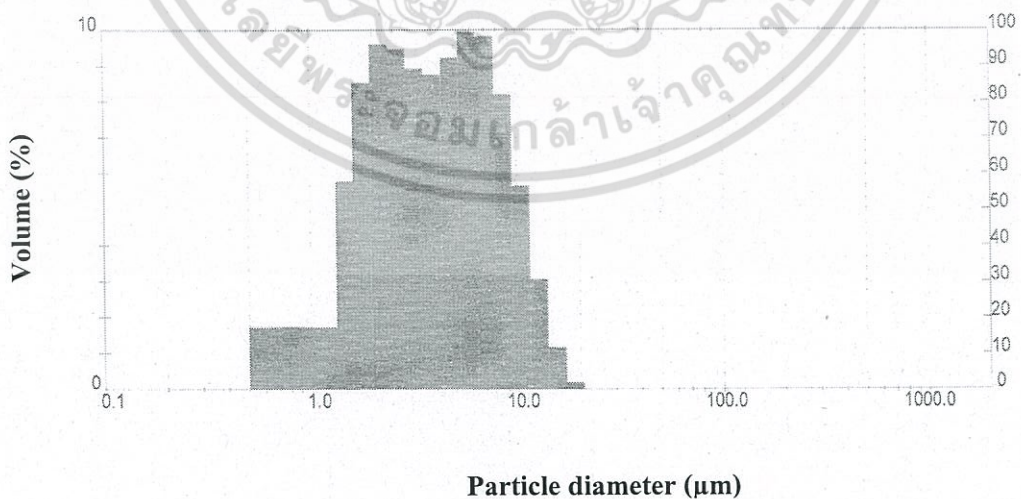
4.1.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

4.1.3.1 สัณฐานวิทยาของ BaSO_4

จากภาพที่ 4.2 (a) พบว่า BaSO_4 มีลักษณะเป็นผลึกแผ่นหนา ยาวขนานไปกับฐานผลึกหรือเป็นผลึกรูปแท่งเหลี่ยมๆ บางส่วนพบเป็นแผ่นบางซ้อนกันค่อนข้างหนา (Coarsely laminated plate) หรือเป็นเม็ดมีลักษณะเป็นเหลี่ยมๆ และพบว่าขนาดอนุภาคของ BaSO_4 มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ปะปนกันไปมีทั้งที่อยู่แบบก้อนเดี่ยวๆ และเกาะรวมกันเป็นกลุ่ม เมื่อนำ BaSO_4 ไปวิเคราะห์ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Mastersizer χ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 4.2 (b) พบว่าการกระจายตัวของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $1.95\text{-}6.39\ \mu\text{m}$ ซึ่งมีปริมาณของขนาดอนุภาคที่อยู่ในช่วงนี้ประมาณ 70% โดยปริมาตร (แสดงในภาคผนวก ง) โดยมีค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคเป็น $4.64\ \mu\text{m}$



(a) SEM micrograph แสดงสัณฐานวิทยาของ BaSO_4 (กำลังขยาย 10,000 เท่า)



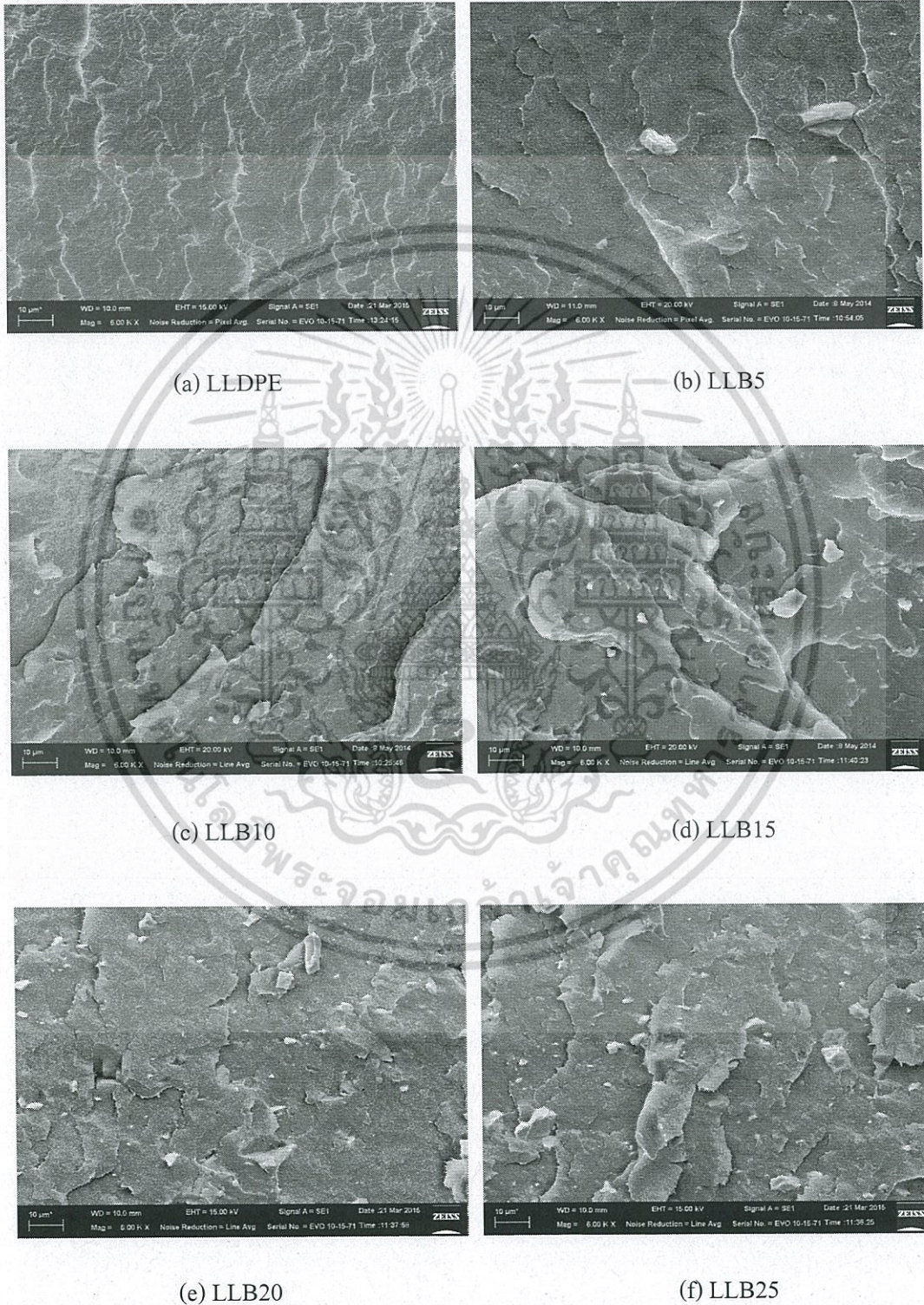
(b) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์ในการกระจายตัวของขนาด

ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของ BaSO_4 และการกระจายตัวของขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.2 สัณฐานวิทยาของคอมโพสิต

การศึกษาการกระจายตัวของ BaSO_4 ใน LLDPE ที่ปริมาณต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.3



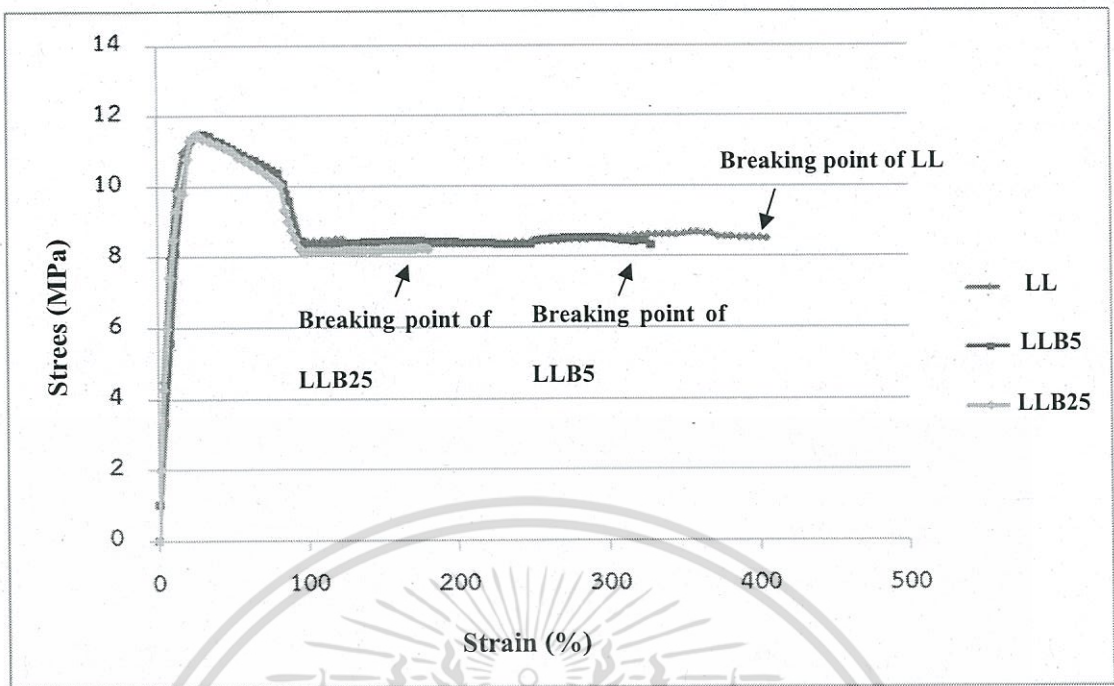
ภาพที่ 4.3 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 ใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (กำลังขยาย 6000 เท่า) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเมื่อผสม BaSO_4 ในปริมาณ 5, 10 และ 15 php ลงใน LLDPE อนุภาค BaSO_4 มีการกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวๆ โดยส่วนใหญ่ และไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน แสดงว่า BaSO_4 มีการแตกตัวและการกระจายตัวที่ดี (Good dispersion and distribution) ใน LLDPE แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ BaSO_4 เป็น 20 และ 25 php พบว่าอนุภาค BaSO_4 มีทั้งส่วนที่แตกตัวออกเป็นอนุภาคเดี่ยว และบางส่วนเกิดการกระจุกกัน แสดงว่ามีโอกาสสูงขึ้นที่การแตกตัวและการกระจายตัวไม่ดี (Poor dispersion and distribution) เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันระหว่าง LLDPE ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ขั้ว กับ BaSO_4 ซึ่งมีขั้ว ส่งผลให้มีการยึดติดระหว่างวัสดุที่ไม่ดี ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอนุภาค BaSO_4 ส่วนใหญ่ไม่เกิดการฝังตัวลงไป ใน LLDPE และมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของอนุภาค BaSO_4 (โดยเฉพาะในภาพที่ 4.3 (e) และ (f))

4.1.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

การศึกษาสมบัติการรับแรงดึงแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO_4 ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และการดึงยืด ณ จุดคราก เนื่องจากพฤติกรรมการเสียรูปของพอลิเมอร์ทุกสูตรผสมมีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งสามารถดูได้จาก Stress-strain curve ในภาพที่ 4.4 ซึ่งพบว่าเมื่อวัสดุได้รับแรงดึงจะมี Necking เกิดขึ้น และยืดยาวไปเรื่อยๆ โดยที่ค่าความเค้น (Stress) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขณะดึงจนถึงสิ้นสุดความยาวของวัสดุ (ซึ่งให้ผลคล้ายกับงานวิจัยของ Wang, K. [2] ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณ BaSO_4 ในช่วง 0-16 %wt ในคอมโพสิต PP/ BaSO_4 ให้ค่า Yield stress ไม่มีเปลี่ยนแปลง) แต่การดึงยืด ณ จุดขาดของ LLDPE/ BaSO_4 มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก LLDPE เป็นวัสดุที่ไม่ขั้ว ในขณะที่ BaSO_4 เป็นวัสดุที่มีขั้วจึงไม่มีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุ (ซึ่งสามารถดูได้จากผลของ SEM ในภาพที่ 4.3) และไม่สามารถเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ BaSO_4 ที่เติมลงไปมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเมื่อมีปริมาณ BaSO_4 มากขึ้น เปรียบเสมือนการมีจุดบกพร่องในชิ้นงานหรือเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้น (Stress concentrator) ส่งผลให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจะเกิดการแยกออกบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุได้ง่าย ทำให้วัสดุยืดได้น้อยลงก่อนเกิดการฉีกขาดหรือเกิดการเสียหาย



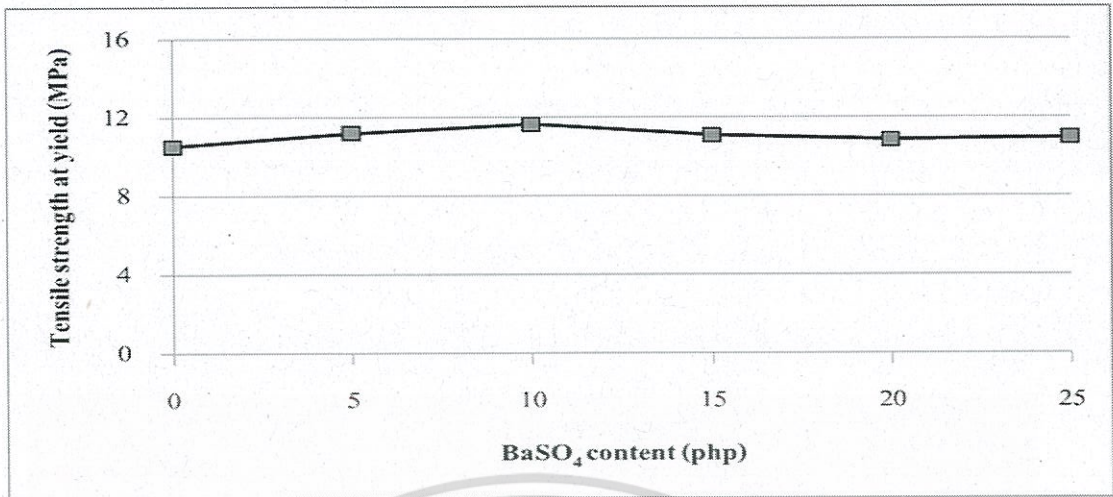
ภาพที่ 4.4 Stress-strain curve ของคอม โพลีต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.5 (e) และ 4.6 พบว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ลงไปทำให้ค่า Young's modulus และค่าความแข็งของวัสดุเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO₄ เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาค BaSO₄ มีค่าความแข็ง (ประมาณ 3.5 Mohs) มากกว่าความแข็งของ LLDPE

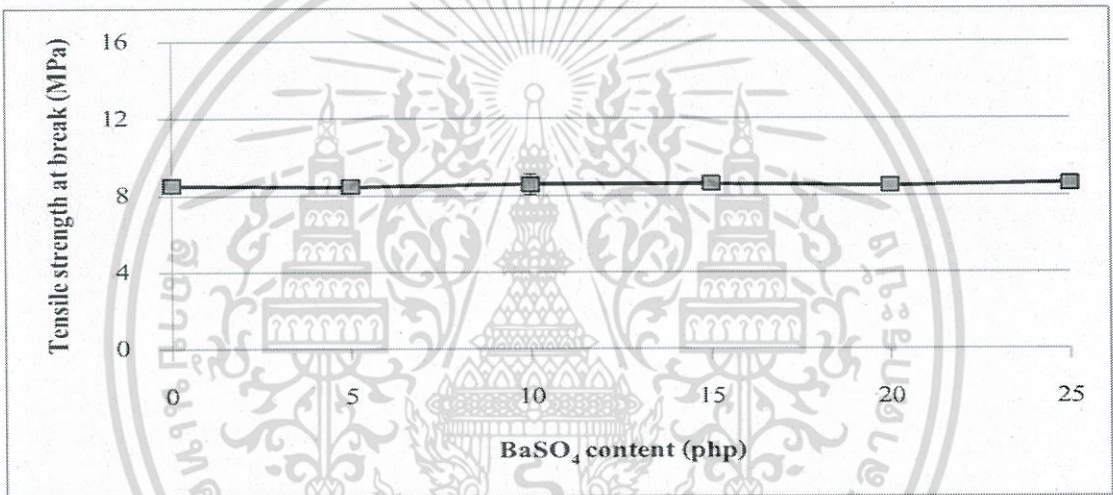
ผลการศึกษาสัมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่าการเติมอนุภาค BaSO₄ ลงไปในปริมาณเพียงเล็กน้อย (5 php) ทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากรูปร่างทางสัณฐานวิทยาของ BaSO₄ มีลักษณะเป็นก้อนที่มีความเหลี่ยม ซึ่งดูได้จากผลของ SEM ในภาพที่ 4.1 (a) และ 4.3 โดยบริเวณที่เป็นเหลี่ยมจะเป็นเหมือนจุดศูนย์รวมแรงคั้นทำให้วัสดุรับแรงกระแทกได้ไม่ดี และการเติม BaSO₄ เป็นการเพิ่มวิฤภาคของแข็ง และทำให้ความต่อเนื่องของวิฤภาค LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ลดลง ทำให้เมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเปรียบเทียบกับ LLDPE ดังนั้นคอม โพลีต LLDPE/BaSO₄ ทุกสูตรผสมจึงแตกหักได้ง่ายกว่า LLDPE

การเพิ่มปริมาณ BaSO₄ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเพิ่มส่วนที่ส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงได้ไม่ดีในพอลิเมอร์เมตริกซ์ การเติม BaSO₄ ในปริมาณสูง (20 และ 25 php) พบว่ามีอนุภาค BaSO₄ บางส่วนเกิดการกระจุกตัวกันหรือมีการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งยืนยันจากผลของ SEM ในภาพที่ 4.3 (e) และ (f) การกระจุกตัวกันของอนุภาค BaSO₄ เป็นเหมือนจุดบกพร่องในชิ้นงานทำให้ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง

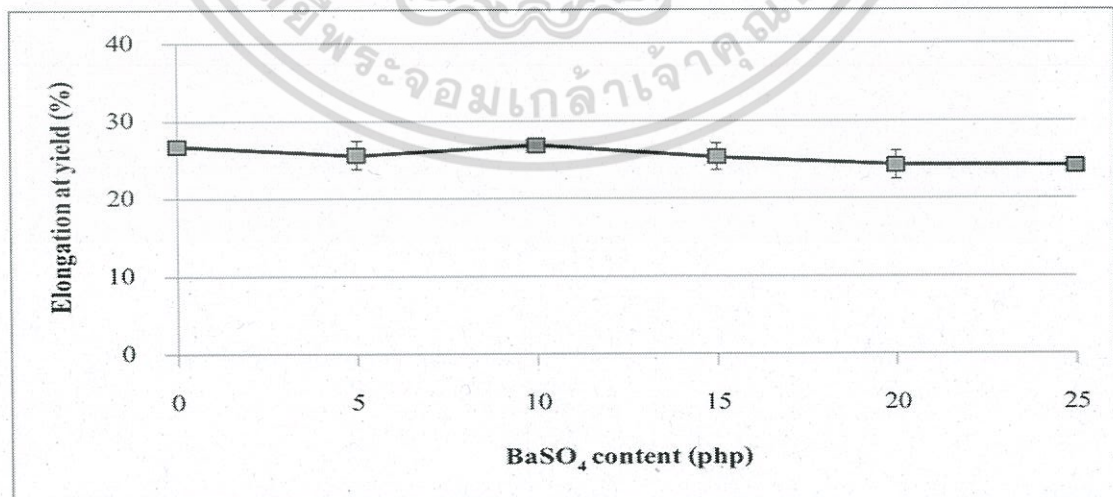
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก

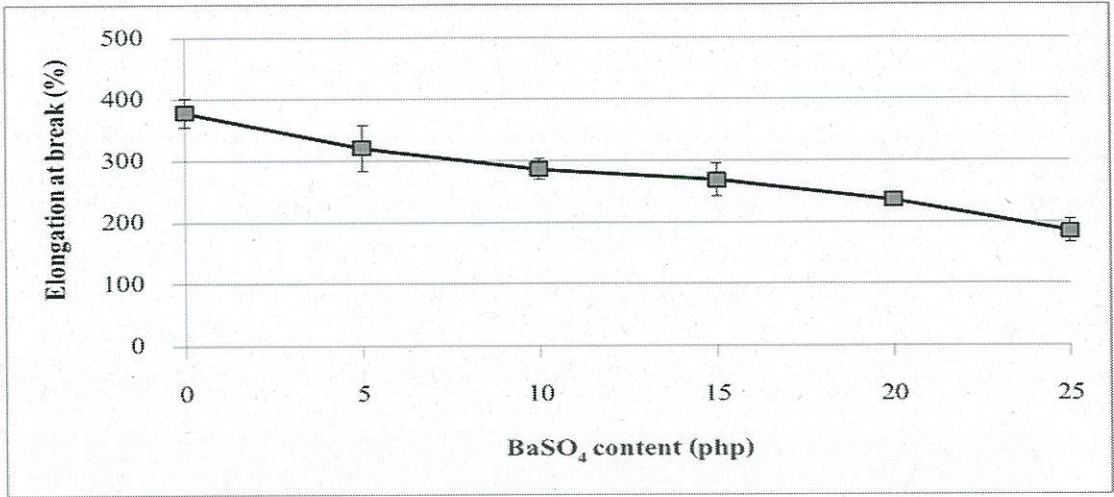


(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด

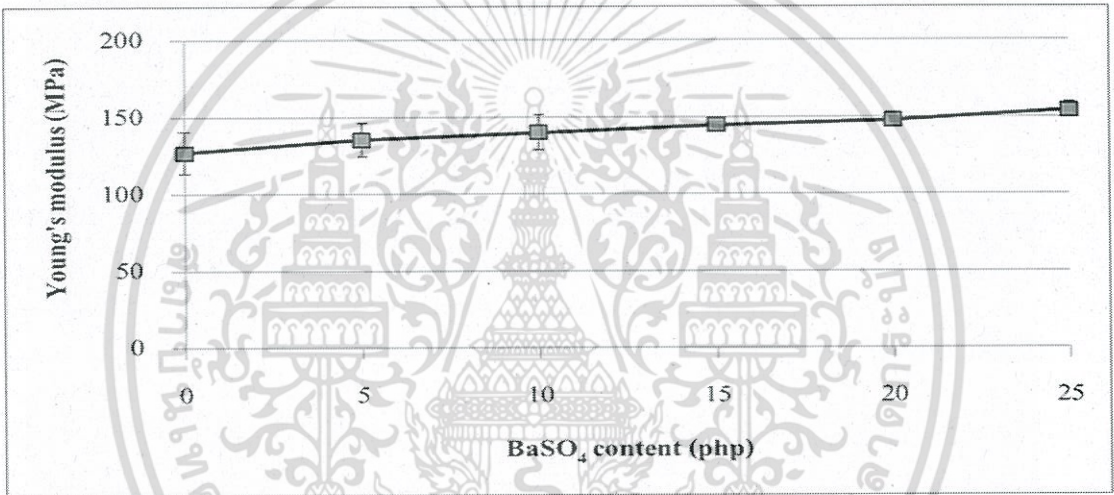


(c) การดัดยืด ณ จุดคราก

ภาพที่ 4.5 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ต่างกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

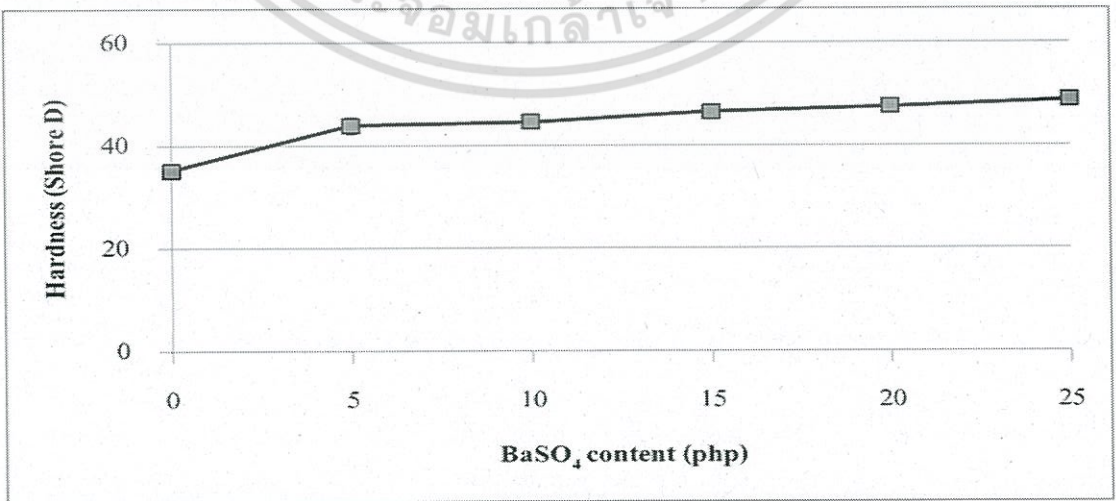


(d) การดึงยืด ณ จุดขาด

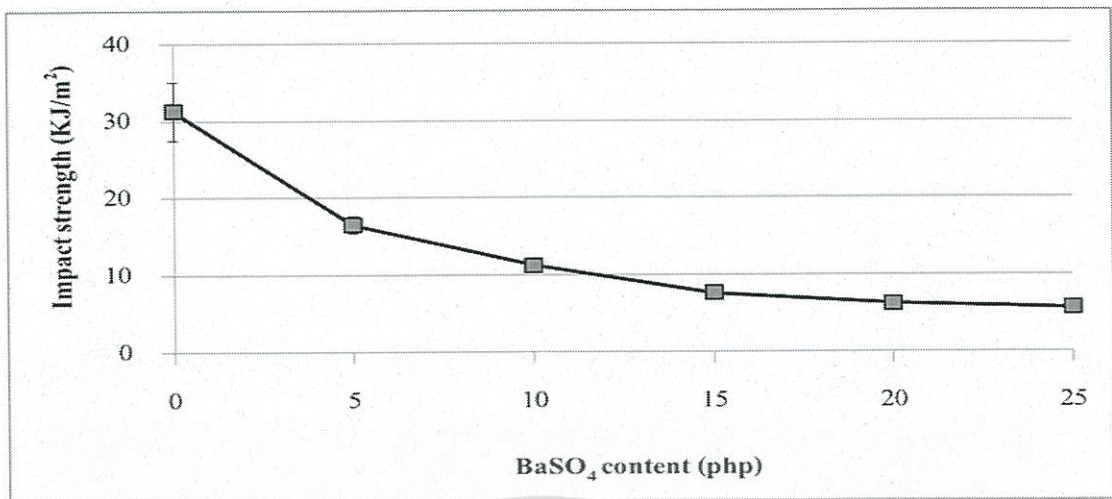


(e) ยั่งมอดคูลัส

ภาพที่ 4.5 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน



เอกสารนี้เป็นภาพที่ 4.6 ความแข็งกดของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ แตกต่างกัน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ ต่างกัน

4.1.5 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

การเสียหายเนื่องจากความเค้นทางสภาพแวดล้อม (Environmental stress cracking, ESC) เกิดขึ้นเมื่อมีความเค้นภายนอก (External stress) กระทำกับวัสดุ ในขณะที่วัสดุสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ได้แก่ ของเหลวหรือไอทำให้วัสดุเสียหายก่อนเวลาอันควร (Premature failure) แต่การทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [51] ออกแบบมาเพื่อใช้ทดสอบกับ PE เป็นหลัก เนื่องจาก PE เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้บรรจุสารชำระล้าง (Surfactant) เช่น สบู่ แชมพูสระผม และน้ำยาทำความสะอาดพื้น เป็นต้น ทำให้บรรจุภัณฑ์ PE พบปัญหาการเกิดรอยแตกในระหว่างการใช้งานมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติ ESCR ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ เพื่อที่จะได้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อ ESCR และทราบถึงลักษณะการเสียหายของวัสดุที่เกิดขึ้น

การทดสอบทำได้โดยเตรียมตัวอย่างดังภาพที่ 3.2 จากนั้นนำมาทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ผลที่ได้จากการทดลองแสดงในภาคผนวก จ นำผลที่ได้มารายงานค่าความต้านทานแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อม (ESCR, F₅₀) คือ เวลาที่มีตัวอย่าง 50% มีรอยแตกเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ในทางทฤษฎีการเสียหายจากแรงเค้นจากสิ่งแวดล้อม เกิดเนื่องจากการดูดซับ (Absorption) Stress cracking agent เข้าไปในบริเวณที่เป็นจุดบกพร่องหรือบริเวณที่มีความเค้นสะสมในชิ้นงาน เช่น Micro-yield, Micro-void, Stress-dilated zone หรือ เครซ จากนั้นโมเลกุลของ Stress cracking agent จะแพร่ไปยังสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และทำหน้าที่คล้ายกับพลาสติกไซ-เซอร์ โดยเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น ส่งผล

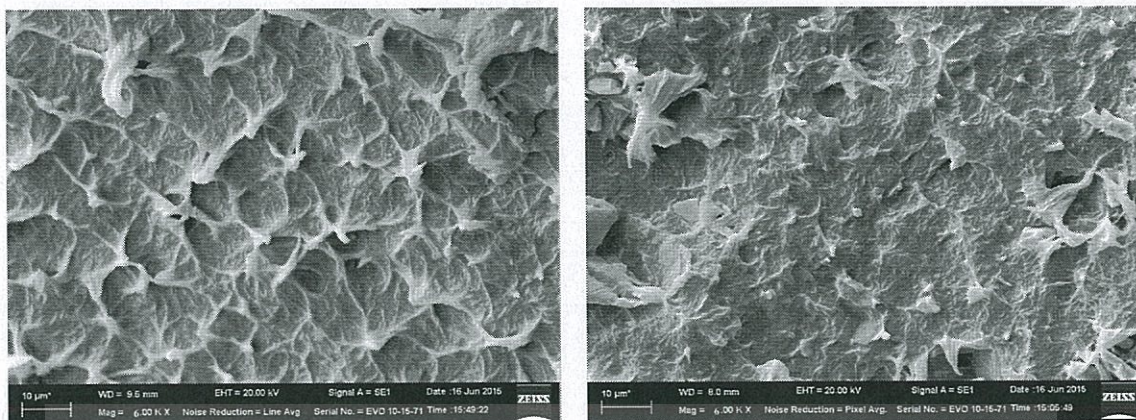
เอกสารนี้ให้พอลิเมอร์คลายสายโซ่โมเลกุลที่เกี่ยวข้องกัน (Chain disentanglement) ได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบริเวณ Tie molecule การหลุดออกของสายโซ่โพลิเมอร์ส่งผลให้เกิดการขยายรอยแตก และเกิดการเสียหายของวัสดุในเวลาต่อมา [51]

จากการศึกษาสมบัติความต้านทานต่อสภาพแวดล้อมพบว่า การเติมอนุภาค BaSO_4 ลงไปทำให้ค่า ESCR ของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวที่แตกหักของตัวอย่าง หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ในภาพที่ 4.8 พบว่าสูตร LLDPE มีช่องว่างหรือรอยแตกเกิดขึ้นจำนวนมาก และรอยแตกมีการกระจายอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ในขณะที่ LLB25 พบว่ามีรอยแตกเกิดขึ้นน้อยกว่า อาจจะมีสาเหตุมาจากการมีอยู่ของ BaSO_4 ทำให้รอยแตกต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ทำให้มีพื้นที่หรือระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น และการเติม BaSO_4 เป็นการลดวัฏภาคในส่วน of LLDPE ที่เป็นโพลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการเสียหาย ทำให้การเสียหายของวัสดุเกิดขึ้นได้ช้าลง หรืออาจจะมีสาเหตุมาจาก BaSO_4 ไปเปลี่ยนพฤติกรรมของการเสียหายของวัสดุ โดย BaSO_4 ทำให้โอกาสในการเกิดการเสียหายแบบพลาสติก (Plastic deformation) ในวัสดุเพิ่มขึ้น ซึ่งมักจะเกิดบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ดังนั้นยังมีปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น ค่า ESCR ของวัสดุจะดีขึ้น นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเติม BaSO_4 ที่มีขั้วสูงลงไปทำให้สภาพผิวของวัสดุเพิ่มขึ้น ทำให้การแทรกของ Stress cracking agent เข้าไปในวัสดุเกิดได้ยาก

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีปริมาณ BaSO_4 แตกต่างกันใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F_{50} (h)
LL	2
LLB5	3
LLB10	6
LLB15	68
LLB20	213
LLB25	244



(a) LL

(b) LLB25

ภาพที่ 4.8 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของตัวอย่างหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า)

4.2 การศึกษาผลของการใช้สารช่วยกระจายตัว SA และการใช้สารช่วยผสม

LLDPE-g-MA

จากการทดสอบสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าการเติมสารตัวเติม BaSO₄ ลงใน LLDPE ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น และยัง能够帮助ปรับปรุงสมบัติ ESCR ของวัสดุให้ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้ต้องการวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง จึงต้องเลือกสูตรคอม- โพลีเมอร์ที่ใช้สารตัวเติมในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมในปริมาณสูงทำให้เกิดปัญหาเรื่องการกระจายตัวที่ไม่ดีของ BaSO₄ ใน LLDPE เนื่องจากความมีขั้วที่แตกต่างกันของทั้ง 2 วัสดุ และยังส่งผลให้มีการยึดติดระหว่างวัสดุที่ไม่ดี

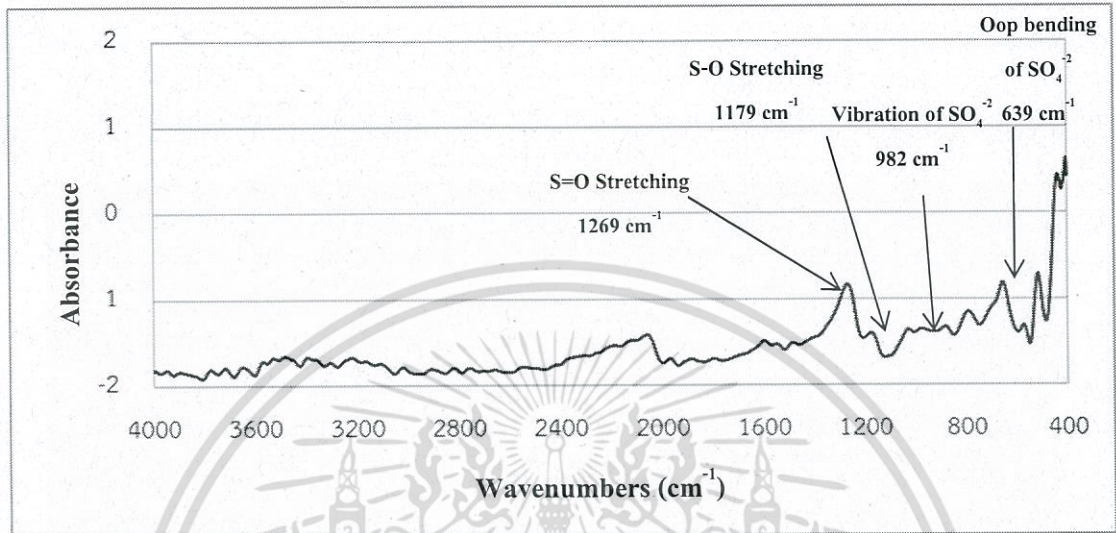
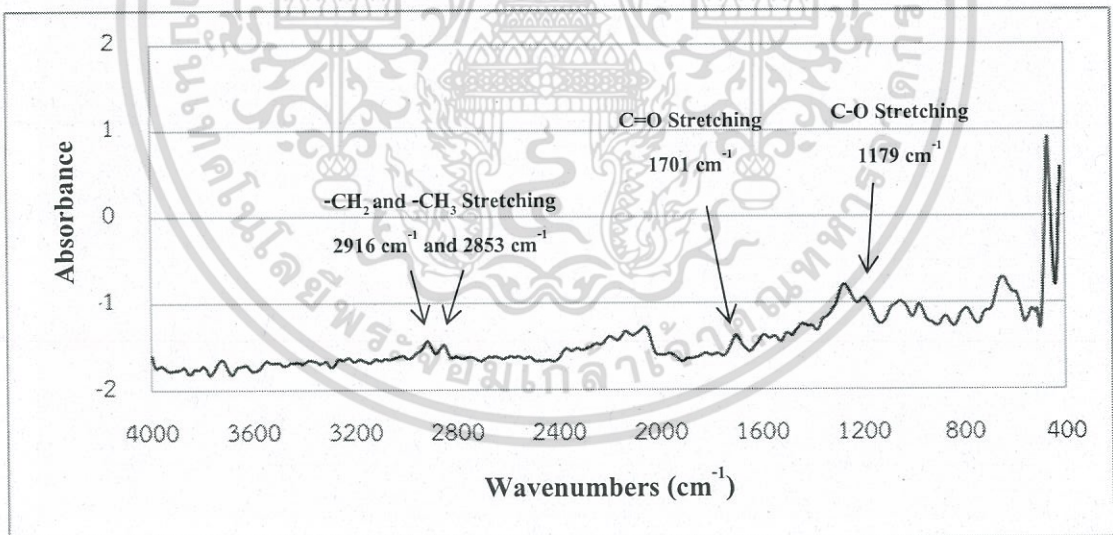
ในงานวิจัยนี้จึงเลือกสูตร LLDPE/BaSO₄ ที่มีปริมาณ BaSO₄ 25 php (LLB25) มาแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA ในปริมาณ 1 %wt ของสารตัวเติมมาเคลือบผิว BaSO₄ เพื่อให้ BaSO₄ สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น และเลือกใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในปริมาณ 1, 2 และ 3 %wt ของสารตัวเติม เพื่อปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัสดุ

4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ BaSO₄ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

4.2.1.1 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริก

จากภาพที่ 4.9 (a) เป็นสเปกตรัมของ BaSO₄ ซึ่งพบพีคการสั่นที่สำคัญที่เลขคลื่น 639, 982, 1179 และ 1269 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพีคการสั่นของ Out-of-plane bending ของหมู่ซัลเฟต (Sulfate, -SO₄²⁻), พีคการสั่นแบบสมมาตรของ SO₄²⁻, พีคการสั่นของ S-O Stretching และพีคการสั่นของ S=O Stretching [52] ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วยกรดสเตียริก จากภาพที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 (b) สังเกตพบการมีหมู่ฟังก์ชันของ C=O Stretching ที่ 1701 cm^{-1} , C-O Stretching ที่ 1179 cm^{-1} , $-\text{CH}_2-$ และ CH_3- Stretching ที่ 2916 และ 2853 cm^{-1} ตามลำดับ [53] ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ยืนยันการมีกรดสเตียริกเคลือบอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค BaSO_4 จริง

(a) BaSO_4 (b) BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

ภาพที่ 4.9 ผลการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR

4.2.1.2 ผลการตรวจสอบปริมาณกรดสเตียริก

ในการทดลองได้ใช้สารช่วยกระจายตัว SA มาเคลือบผิวอนุภาค BaSO_4 โดยใช้ปริมาณกรดสเตียริก 1 %wt ของสารตัวเติม ผ่านกระบวนการโซนิเคชัน เมื่อนำ BaSO_4 ที่เคลือบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวด้วยกรดสเตียริกไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดสเตียริก โดยนำไปเผาด้วยครุชีเบ็ด และคำนวณตามสมการที่ 3.3 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน BaSO_4 มีค่าเท่ากับ 1.2 %wt ของสารตัวเดิม

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ BaSO_4 และความหนาแน่นของคอมโพสิต

จากตารางที่ 4.4 การหาปริมาณ BaSO_4 ด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ BaSO_4 ในคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (25 php) เมื่อนำตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ Density kit จากผลการทดลองพบว่าสูตรที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว SA (LLB25S1) มีค่าความหนาแน่นมากกว่า LLB25 เล็กน้อย เนื่องจาก LLB25S1 มีปริมาณ BaSO_4 ที่แท้จริงมากกว่าสูตร LLB25 เล็กน้อย ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วความหนาแน่นของคอมโพสิตทั้งสองน่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่า SA มีความหนาแน่น (0.847 g/cm^3) น้อยกว่าความหนาแน่นของ LLDPE (0.924 g/cm^3) แต่ในการทดลองใส่ SA ไปในปริมาณน้อย (1 %wt)

สำหรับสูตรที่มีการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA (LLB25G1, LLB25G2 และ LLB25G3) มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับ LLB25 เนื่องจาก LLDPE-g-MA มีค่าความหนาแน่น (0.975 g/cm^3) ใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นของ LLDPE

ตารางที่ 4.4 ปริมาณของ BaSO_4 และความหนาแน่นของชิ้นงานคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

สูตรผสม	ปริมาณ BaSO_4 ที่ต้องการ		ปริมาณ BaSO_4 ที่พบ		ความหนาแน่น (g/cm^3)	
	php	%wt	php	%wt	ค่าจากการทดลอง	ค่าทางทฤษฎี
LLB25	25	20.00	23.53	18.82	1.090 ± 0.002	1.086
LLB25S1	25	19.84	16.09	20.15	1.096 ± 0.001	1.100
LLB25G1	25	19.84	17.24	21.59	1.089 ± 0.003	1.208
LLB25G2	25	19.69	15.67	19.67	1.088 ± 0.001	1.179
LLB25G3	25	19.53	16.14	20.29	1.091 ± 0.001	1.254

4.2.3 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

จากตารางที่ 4.5 พบว่าสูตรที่มีการใช้ BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวด้วย SA และสูตรที่มีการเติม LLDPE-g-MA ลงไปให้ค่า T_m , T_c และความเป็นผลึกใกล้เคียงกันและมีค่าใกล้เคียงกับ LLDPE แสดงว่า SA และ LLDPE-g-MA ไม่รบกวนการตกผลึกของ LLDPE จึงไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นใน LLDPE

ตารางที่ 4.5 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ LLDPE ในคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

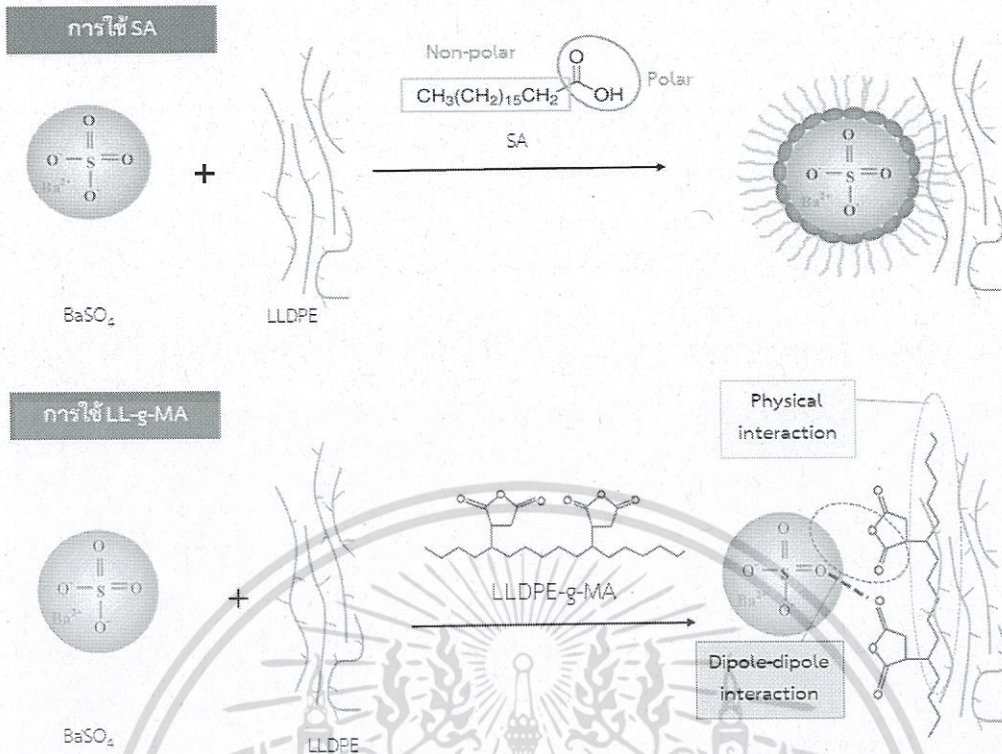
สูตร	T_m (°C)	T_c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
LL	129.6	107.9	35
LLB25	128.4	108.9	34
LLB25S1	128.4	108.8	37
LLB25G1	129.4	108.3	39
LLB25G2	130.7	108.3	38
LLB25G3	130.3	107.9	39

4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะฐานวิทยาของคอมโพสิต

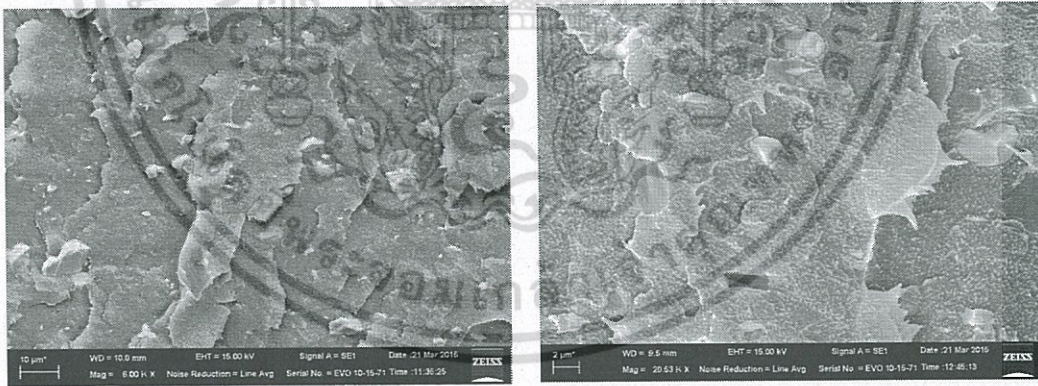
จากการศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในภาพที่ 4.11 (c), (d) และ (e) พบว่าอนุภาค BaSO_4 ส่วนใหญ่มีการฝังตัวได้ดีใน LLDPE และมีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของ BaSO_4 น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร LLB25 และ LLB25S1 ในภาพที่ 4.11 (a) และ (b) ตามลำดับ เนื่องจาก LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาค LLDPE และ BaSO_4 ดีขึ้น โดย MA เกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole force) กับ BaSO_4 และ LLDPE เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังแสดงในภาพที่ 4.10

เมื่อพิจารณาสูตรที่ใช้ BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวของ SA (LLB25S1) กับ LLB25 พบว่ามีอนุภาค BaSO_4 ที่เกิดการกระจุกตัวน้อยลง อนุภาค BaSO_4 ส่วนใหญ่อยู่เป็นอนุภาคเดี่ยวๆ แสดงว่าการกระจายตัวของอนุภาค BaSO_4 ดีขึ้น เนื่องจาก SA จะช่วยลดความมีขั้วของ BaSO_4 ลง โดยจะหันส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีขั้วเข้าหา BaSO_4 และหันส่วนปลายของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วเข้าหาพอลิเมอร์เมทริกซ์ [54] ทำให้อนุภาค BaSO_4 มีโอกาสรวมตัวกันเองน้อยลง อย่างไรก็ตามการใช้ SA ไม่ได้ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคของ LLDPE และ BaSO_4 ดีขึ้น โดยสังเกตได้จาก SEM ในภาพที่ 4.11 (b) พบว่ามีช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการหลุดออกของอนุภาค BaSO_4 มากกว่าใน สูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



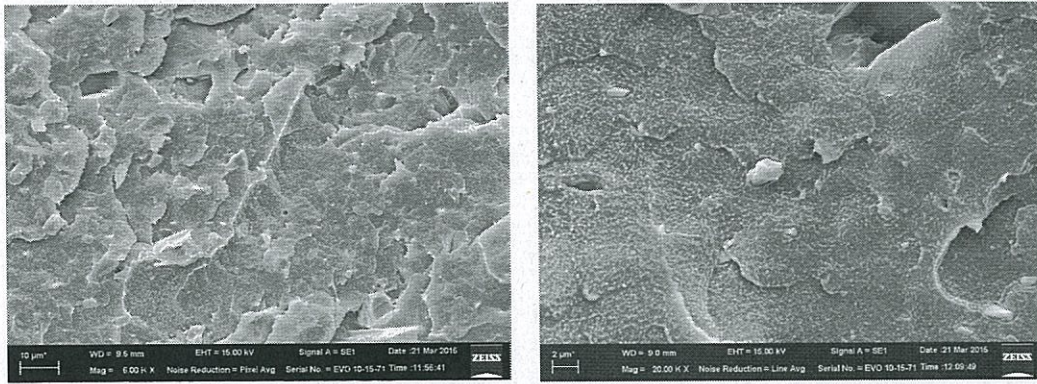
ภาพที่ 4.10 การเกิดอันตรกิริยาระหว่าง LLDPE และ BaSO₄ เมื่อมีการใช้ SA หรือ LL-g-MA



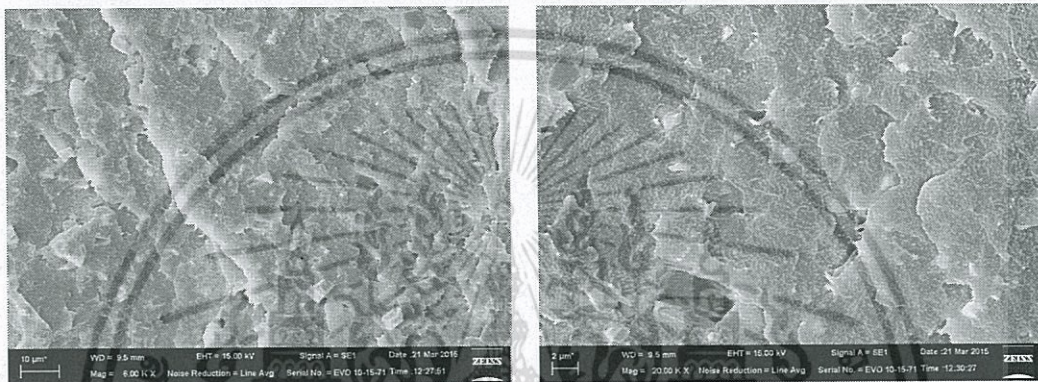
(a) LLB25

ภาพที่ 4.11 SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า)

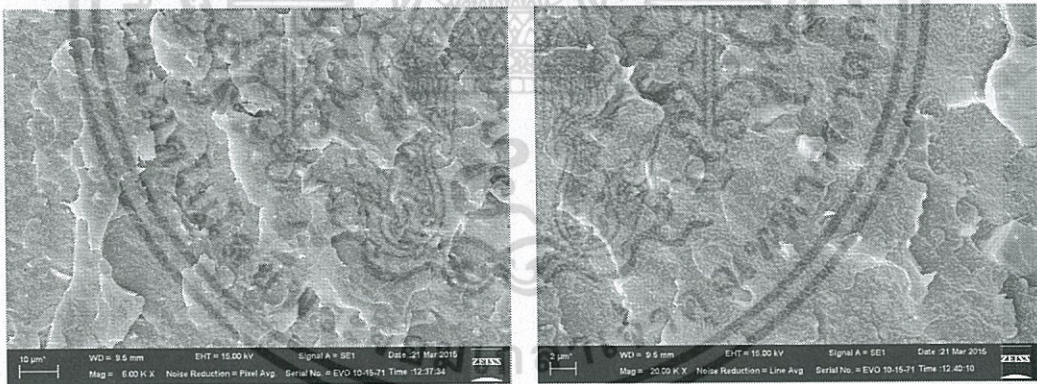
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) LLB25S1



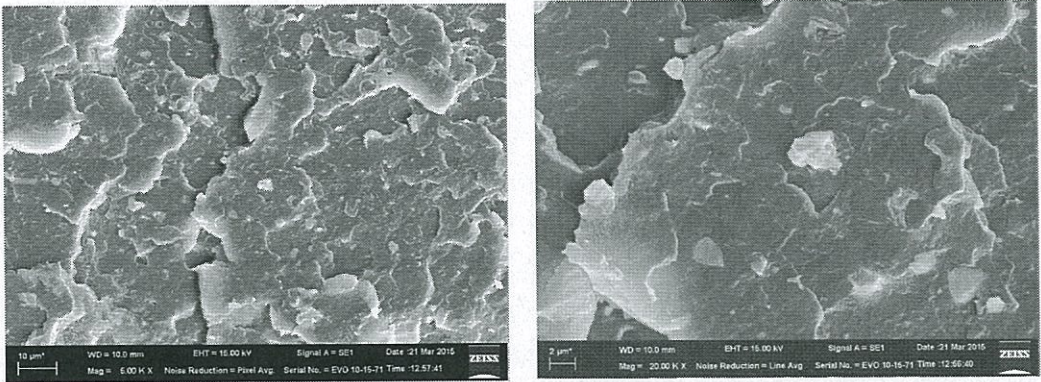
(c) LLB25G1



(d) LLB25G2

ภาพที่ 4.11 (ต่อ) SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



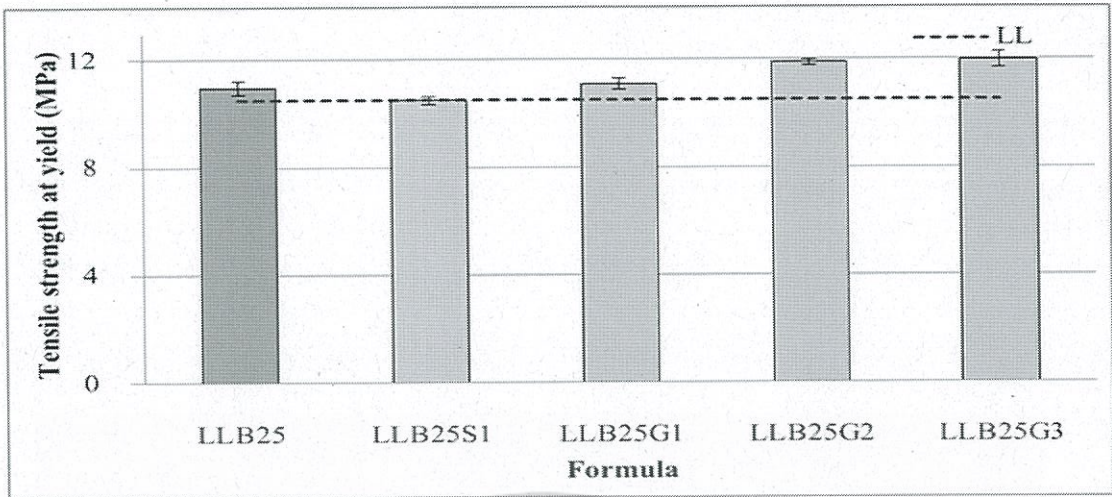
(e) LLB25G3

ภาพที่ 4.11 (ต่อ) SEM micrographs แสดงการกระจายตัวของ BaSO_4 ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสมใน LLDPE ของพื้นผิวที่แตกหัก (ภาพซ้าย : กำลังขยาย 6000 เท่า และ ภาพขวา : กำลังขยาย 20000 เท่า)

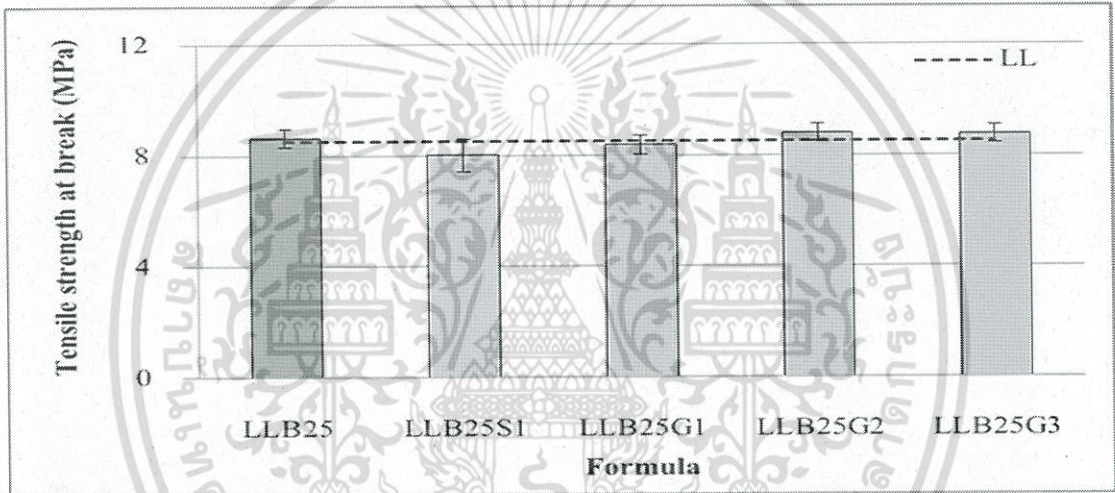
4.2.5 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต

จากผลการทดสอบดังภาพที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง LLB25S1 ซึ่งใช้ BaSO_4 ที่มีการเคลือบผิวด้วย SA กับสูตร LLB25 ที่ไม่มีเคลือบผิวด้วย SA พบว่าให้ค่าสมบัติการรับแรงดึงใกล้เคียงกัน เนื่องจาก SA ทำหน้าที่เป็นเพียงสารช่วยกระจายตัว ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาค ส่วนการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ทำให้มีอันตรกิริยาตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค LLDPE และ BaSO_4 ที่แข็งแรงขึ้น ทำให้วัสดุเสียรูปได้ยากขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำ ส่งผลให้ค่าการดึงยืด ณ จุดคราก และการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า Young's Modulus และความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น แต่พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด (ภาพที่ 4.12 (b)) มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อวัสดุถูกดึงยืดจนกระทั่งเลยจุดคราก การเกี่ยวพันของสายโซ่โพลีเมอร์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคเกิดการหลุดออกไปแล้ว ดังนั้นความแข็งแรงของวัสดุมาจาก LLDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์

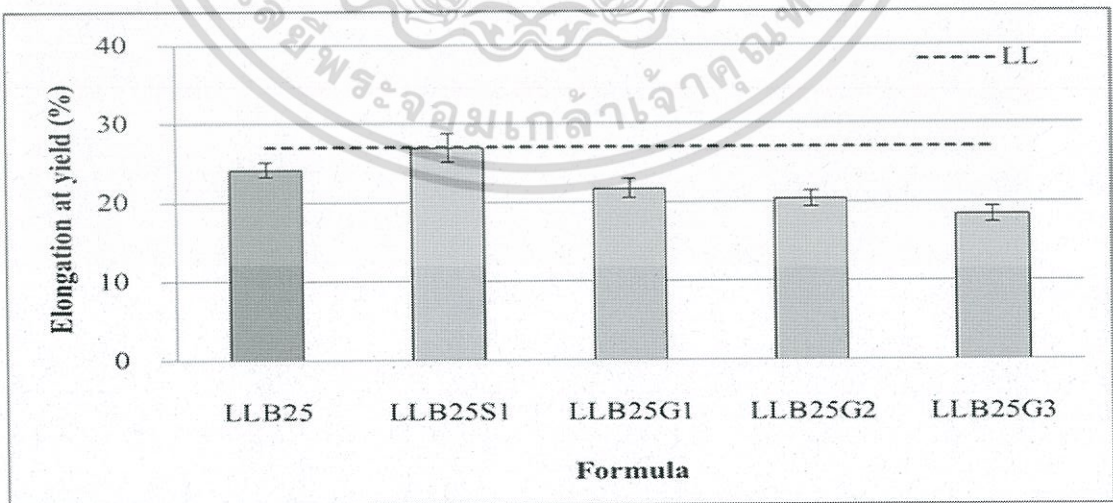
จากภาพที่ 4.13 พบว่าการเคลือบผิว BaSO_4 ด้วย SA และการใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง เนื่องจากผสมเข้าไปในปริมาณน้อยมาก และ LLDPE-g-MA มีวัฏภาคหลักเป็น LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันกับเมตริกซ์ทำให้มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกัน



(a) ความแข็งแรง ณ จุดคราก



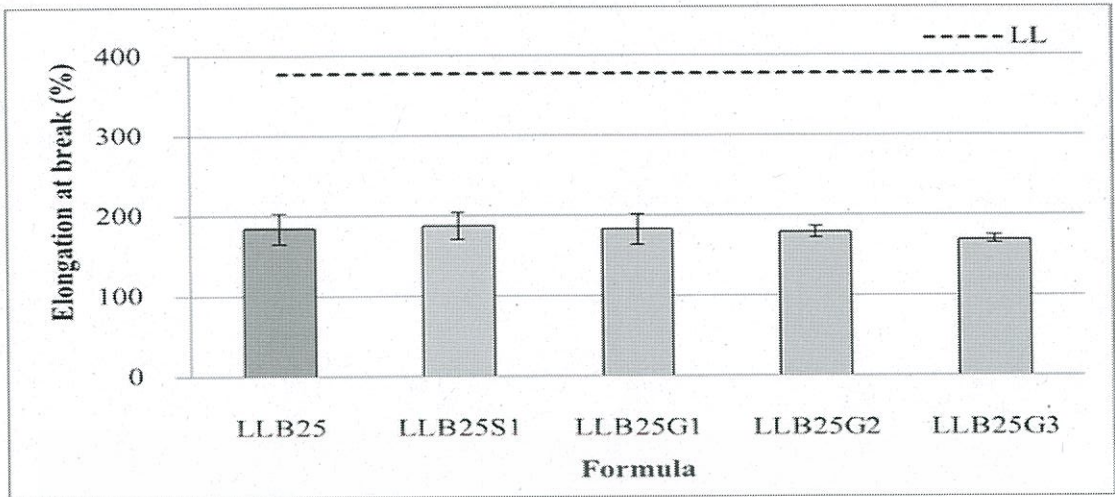
(b) ความแข็งแรง ณ จุดขาด



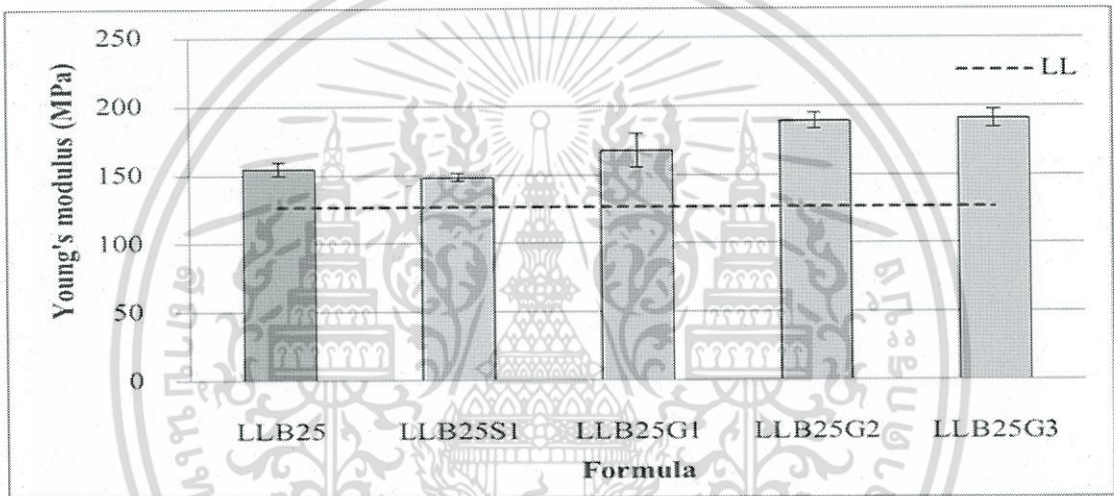
(c) การดัดยัด ณ จุดคราก

ภาพที่ 4.12 สมบัติการรับแรงดึงของคอมโพสิต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ช่วยผสมบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

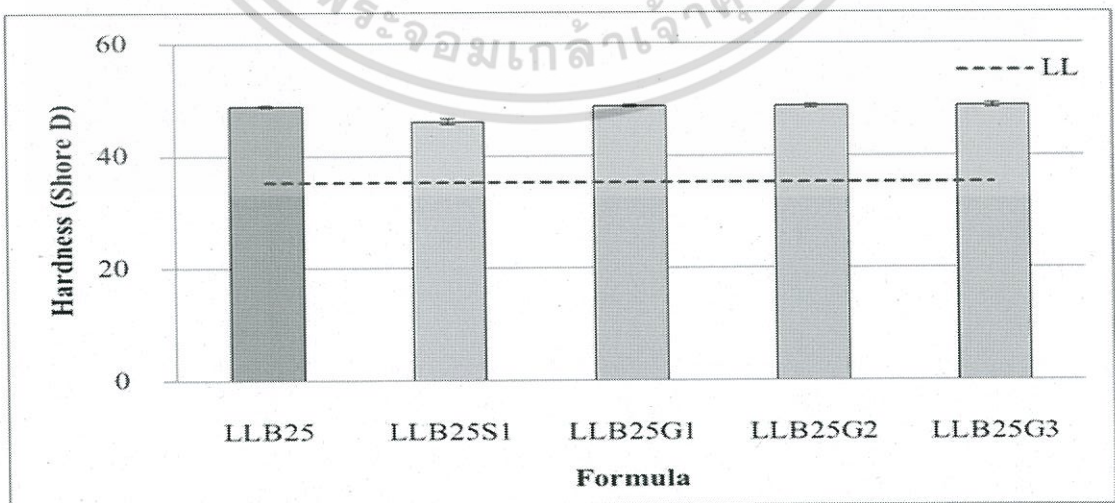


(d) การดึงยืด ณ จุดขาด



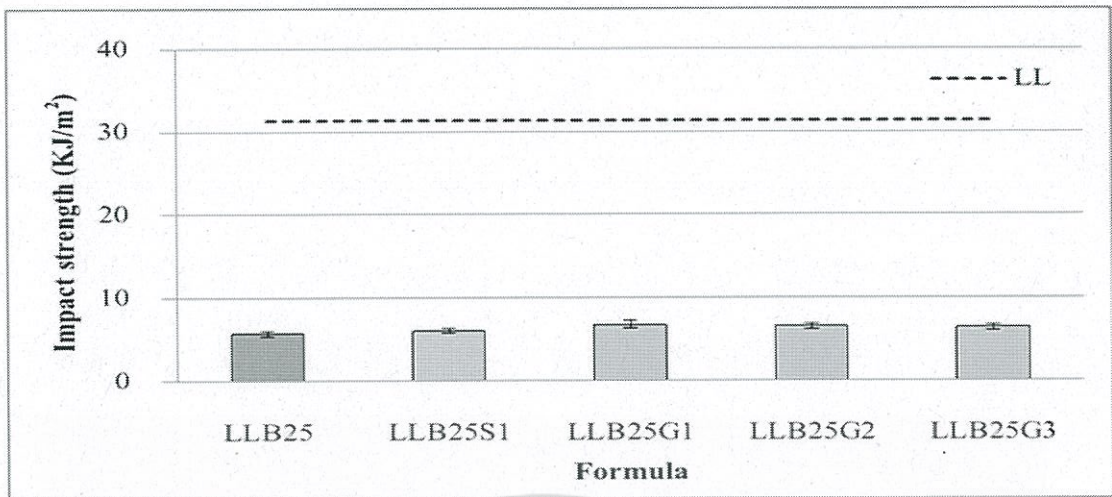
(e) ยืดมอดุลัส

ภาพที่ 4.12 (ต่อ) สมบัติการรับแรงดึงของคอม โพลีต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสม



ภาพที่ 4.13 ความแข็งกดของคอม โพลีต LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วย-

เอกสารนี้เป็นเอกสารผสมวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.14 สมบัติการรับแรงกระแทกของคอมพอลิเมอร์ LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสม

การศึกษาสมบัติการรับแรงกระแทกของวัสดุแสดงในภาพที่ 4.14 พบว่าการเคลือบผิว BaSO₄ ด้วย SA ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุ อาจมีสาเหตุมาจากการทดลองมีการใช้ SA ในปริมาณน้อยเพียง 1 %wt ในการเคลือบผิว BaSO₄ ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยของ Bianchi, F. [8] ซึ่งพบว่าการใช้ Fatty acid 25 %wt ของสารตัวเติม เคลือบผิว BaSO₄ สามารถช่วยเพิ่มสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมพอลิเมอร์ HDPE/BaSO₄ ได้ โดย SA จะทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นในคอมพอลิเมอร์ทำให้วัสดุสามารถขยับสายโซ่ได้ง่าย และส่งผ่านแรงกระทำได้ดี

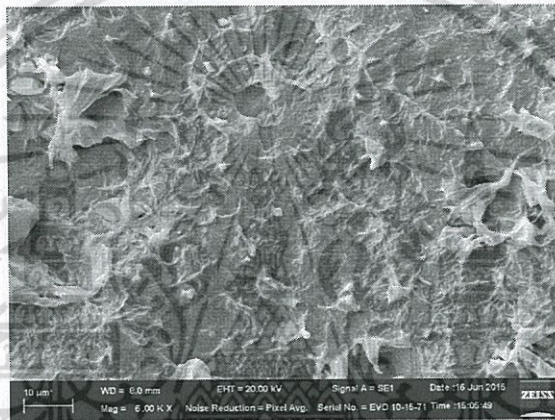
จากผลการทดลองพบว่า การเติม LLDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกของวัสดุ เนื่องจากปัจจัยหลักที่มีผลต่อสมบัติในการรับแรงกระแทกคือปริมาณของอนุภาคของแข็ง ซึ่งเป็นจุดศูนย์รวมแรงเค้นที่ทำให้เกิดการแตกหัก ซึ่งปริมาณ BaSO₄ มีค่าพอๆ กันทุกสูตร

4.2.6 ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

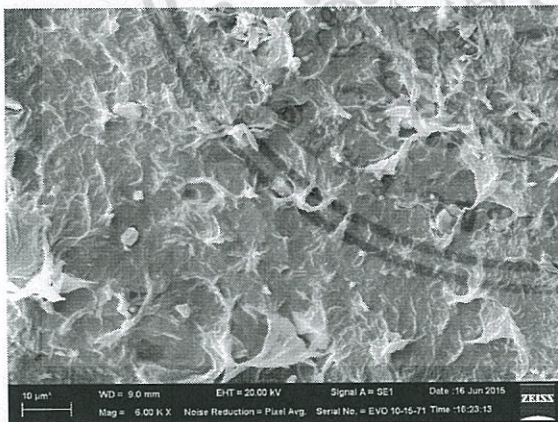
จากตารางที่ 4.6 พบว่าการใช้ BaSO₄ ที่เคลือบผิวด้วย SA มีค่า ESCR ใกล้เคียงกับ LLB25 แต่การใช้สารช่วยผสม LLDPE-g-MA ให้ค่า ESCR ของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จากภาพพื้นผิวที่แตกหักของสูตร LLB25G3 หลังจากผ่านการทดสอบ ESCR ในภาพที่ 4.15 (c) พบว่ามีช่องว่างหรือรอยแตกเกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร LLB25 และ LLB25S1

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของคอมโพสิตที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C

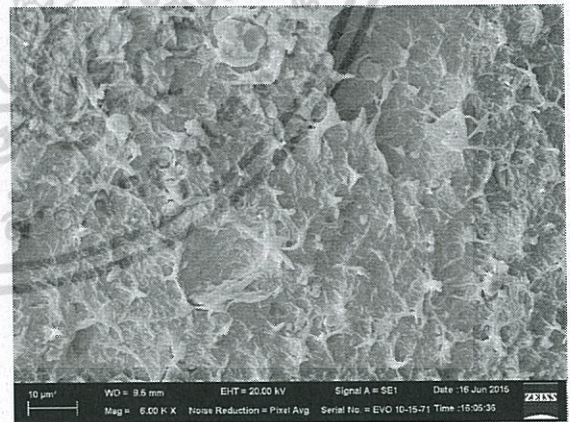
สูตร	ESCR, F ₅₀ (h)
LLB25	244
LLB25S1	250
LLB25G1	2230
LLB25G2	2254
LLB25G3	2424



(a) LLB25



(b) LLB25S1



(c) LLB25G3

ภาพที่ 4.15 SEM micrographs แสดงภาพพื้นผิวที่แตกหักของ LLDPE/BaSO₄ ที่มีการใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมหลังจากผ่านการทดสอบ ESCR (กำลังขยาย 6000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ ESCR ในสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก อาจมีสาเหตุเนื่องจากการการเติม LLDPE-g-MA ทำให้พฤติกรรมการเสียดสภาพของวัสดุเปลี่ยนไป ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.15 พบว่ามีบริเวณที่เกิด Yielding ขนาดเล็กจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับ LLB25 และ LLB25S1 อาจมีสาเหตุมาจากการใช้ LLDPE-g-MA ทำให้สภาพผิวของวัสดุเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และทำให้วัฏภาคของ LLDPE กับ BaSO₄ มีการเข้ากันได้มากขึ้น ช่วยหน่วงการแพร่ของ Stress cracking agent เข้ามาภายในวัสดุได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เตรียมคอมโพสิตจาก LLDPE ที่มีการใช้ BaSO_4 เป็นสารตัวเติม โดยศึกษาผลของปริมาณ BaSO_4 และมีการปรับปรุงสมบัติโดยใช้สารช่วยกระจายตัว SA หรือสารช่วยผสม LLDPE-g-MA เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ให้ดีขึ้น จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของปริมาณ BaSO_4 ในคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 พบว่าค่าความหนาแน่นของคอมโพสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้นตามกฎของของผสม และพบว่าคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกเคียงใกล้กัน เมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น อนุภาค BaSO_4 มีการกระจายตัวไม่ดีใน LLDPE โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตรที่มีปริมาณ BaSO_4 สูงๆ และมีการยึดติดระหว่างวัฏภาคไม่ดี เนื่องจากความแตกต่างของความมีขั้วระหว่าง 2 วัฏภาค และพบว่าเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น ยังมีอนุคลัสต์และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ BaSO_4 เพิ่มขึ้น

2. การศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว SA และสารช่วยผสม LLDPE-g-MA ในคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ที่มีปริมาณ BaSO_4 25 php พบว่าการใช้ SA (1 %wt) และ LLDPE-g-MA (1, 2 และ 3 %wt) ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของคอมโพสิต และพบว่าคอมโพสิตทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกเคียงใกล้กัน การใช้ SA ช่วยให้ BaSO_4 มีการแตกกระจายใน LLDPE ดีขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และค่า ESCR ไม่แตกต่างจากสูตร LLB25 และพบว่าสูตรที่มีการใช้ LLDPE-g-MA ช่วยให้การยึดติดระหว่างวัฏภาคดีขึ้น โดย MA เกิดแรงระหว่างขั้วกับ BaSO_4 และ LLDPE เกิดการเกี่ยวพันกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ และพบว่าเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และยังมีอนุคลัสต์เพิ่มขึ้น ในขณะที่การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง จากผล ESCR พบว่าค่า ESCR เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อปริมาณ LLDPE-g-MA เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเลือกใช้ BaSO_4 เกรดนาโน เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการรับแรงกระแทกของคอมโพสิต LLDPE/ BaSO_4 ให้ดีขึ้น

2. ควรเพิ่มความเร็วยอบ และเวลาในการผสม เพื่อให้อนุภาค $BaSO_4$ มีการแตกตัว และมีการกระจายตัวได้ดีขึ้นใน LLDPE แต่ควรระวังเพราะอาจจะทำให้พอลิเมอร์เกิดการเสียดสภาพได้
3. ควรปรับเปลี่ยนชนิดของ Stress cracking agent ให้เหมาะกับตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดสอบ ESCR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณัฐวุฒิ พัทธ์ศิริ. “กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดออตรีดขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดดัดแปร.” วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [2] K. Wang, W. Jingshen, L. Ye and H. Zeng. “Mechanical properties and toughening mechanisms of polypropylene/barium sulfate composites.” **Composites Part A Applied Science and Manufacturing** 34 (2003) 1199-1205.
- [3] Y.H. Hui and F. Sherkat. “**Handbook of food science technology, and engineering.**” volume 3. CRC Press. 2006.
- [4] อธิพิล แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการเรียนวิชาพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [5] K.S. Ariffin. “**Mineral Perindustrian : Barite (Barium)**” 2001. [online]. Available: <http://lidarmax.altervista.org/lidar/SCIE%20CHIMICHE/BARIO%20generici/Baryte.pdf>.
- [6] นพวรรณ ชนัญพานิช และอุทุมมา มัชฌะณิมิ. “แผ่นเส้นใยนาโนคอมโพสิตป้องกันรังสีเอกซ์.” รายงานการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2552.
- [7] K. Wang, W. Jingshen, L. Ye and H. Zeng. “**Microstructure and Fracture Behavior of Polypropylene/Barium Sulfate Composites.**” 2005. [Online]. Available: <http://www.interscience.wiley.com>.
- [8] F. Bianchil, A. Lazzeri, M. Pracella, A. D’Aquino and G. Ligeri. “Physical-Mechanical and Thermal Properties of Polyethylene Toughened with Submicron BaSO₄ Particles.” **Macromolecular Symposium.** 218 (2004) 191-200.
- [9] อธิพิล แจ่มชัด. “เอกสารประกอบการสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต.” กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [10] M.D. Sami. “Using of Fiber Composite of Polypropylene to Manufacturing Cars Bumpers.” **International Journal of Applied Nonlinear Science** 3(2) (2012) 111-113.

- [11] หลุทกัก กิระติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิตติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ.” 2552. [Online]. Available: http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=zoXKryVMon21201.pdf&file_basename=18-32%20%CB%C4%B7%C0%D1%A4.pdf.
- [12] M.M. Schwartz. “**Composite Materials.**” 1. New Jersey: Prentice Hall PTR. 1996.
- [13] F.W. Billmeyer. “**Textbook of Polymer Science.**” New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [14] R.B. Seymour. “**Polymer Chemistry an Introduction.**” 3rd ed. New York: Dekker. 1992.
- [15] วันชาติ ปรีชาติวงศ์. “**พอลิเมอร์ (Polymer).**” 2554. [Online]. Available: www.gocities.com/thaimafia/orchem/polymer.ppt.
- [16] J. Soares, R. Abbott and J. Kim. “Environmental Stress Cracking Resistance of Polyethylene : The Use of CRYSTAF and SEC to Establish Structure–Property Relationships.” **Journal of Polymer Science Polymer Physics** 38 (2000) 1267-1275.
- [17] T.L. Richardson. “**Industrial Plastics: Theory and Application.**” 2nd ed. New York: Delmar. 1989.
- [18] Lotte Chemical Titan Holding Sdn. Bhd. “**Product – PE and PP.**” 2012. [Online]. Available: <http://www.lottechem.my/products/>.
- [19] K.S. Ariffin. “**Mineral Perindustrian.**” 2015. [Online]. Available: <http://mineral.engusm.my/web%20halaman%20mineral/Baryte.pdf>.
- [20] A. Paytan, S. Mearon, K. Cobb and M. Kastner. “**Origin of Marine Barite Deposits : Sr and Isotope Characterization.**” 2002. [Online]. Available: http://eesc.columbia.edu/w4937/Readings/paytan_etal_2002.pdf.
- [21] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. “**มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 846-2548. แบบเรียกซื้อฟีดสำหรับอุตสาหกรรม.**” 2548. [Online]. Available: <http://www2.rid.go.th/research/vijais/moa/fulltext/TIS846-2548.pdf>.
- [22] R. Kresse, U. Baudis, P. Jager, H.H. Riechers, H. Wagner, J. Winkler and H.U. Wolf. “**Barium and Barium Compounds.**” Weinheim: Wiley-VCH. 2007.
- [23] กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีสำนักงานอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่กระทรวงอุตสาหกรรม. “**การเปรียบเทียบความเหมือน-ความต่างระหว่างแร่แบไรต์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศกับแร่ที่ผลิตได้ในประเทศไทย.**” 2552. [Online]. Available: <http://www1.dpim.go.th/dt/pper/000001266810852.pdf>.

- [24] สุขชัย คณะรัมย์ย์. “กระบวนการแต่งแร่ Barite.” 2546. [Online]. Available: <http://www.mne.eng.psu.ac.th/knowledge/student/Barite2/process.htm>.
- [25] P & S Barite Mining Co., Ltd. “Barite/Baryte (BaSO₄).” 2555. [Online]. Available: <http://http://pandsgroup.com/th/products.htm>.
- [26] A.G. Hadi, F. Lafta, A. Hashim, H. Hakim, A.I.O. Al-Zuheiry, S.R. Salman and H. Ahmed. “Study the Effect of Barium Sulphate on Optical Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA).” **Journal of Applied Polymer Science** 1(2) (2013) 52-55.
- [27] A. Tawansi, A. El-Khodary and M.M. Abdelnaby. “A Study of the Physical Properties of FeCl₃ Filled PVA.” **Current Applied Physics** 5 (2005) 572-578.
- [28] E.R. Riegel. “**Handbook of Industrial Chemistry.**” 9th ed. New York: VNR, C. 1992.
- [29] L.G. Wade. “**Organic Chemistry.**” New Jersey: Prentice-Hill. 1995.
- [30] A. Lazzeria, S.M. Zebarjadb, M. Pracellac, K. Cavalierd and R. Rosad. “Filler Toughening of Plastics. Part 1—The Effect of Surface Interactions on Physico-Mechanical Properties and Rheological Behaviour of Ultrafine CaCO₃/HDPE Nanocomposites.” **Journal of Polymer Materials** 46 (2005) 827–844.
- [31] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. “สารปรับแต่งพอลิเมอร์.” กรุงเทพฯ: บุกเน็ต. 2547.
- [32] A.W.M. Kahar, H. Ismail and N. Othman “Effects of Polyethylene-Grafted Maleic Anhydride as a Compatibilizer on the Morphology and Tensile Properties of (Thermoplastic Tapioca Starch)/(High Density Polyethylene)/(Natural Rubber) Blends.” **Journal of Vinyl and Additive Technology** 18(1) (2012) 65-70.
- [33] Warya., M. Romli, A. Suryani, I. Yuliasih and S. Johan. “Using of a Compatibilizer to Improve Morphological, Physical and Mechanical Properties of Biodegradable Plastic from Thermoplastic Starch/LLDPE Blends.” **International Journals of Engineering and Sciences** 13(01) (2013) 115-122.
- [34] A. Pankai, E.M. Araujo and J.A.M. Tomas. “**Rheological Behavior of PA6/PEGAA/LDPE Blend and the Effect of the Mixing Sequence on the Mechanical Properties and Morphology.**” 2015. [Online]. Available: [Tomas_Melo/publication/OGICAL267559243_RHEOL_BEHAVIOR_OF_PA6PEGAALDPE_BLEND_AND_THE_EFFECTOF_THE_MIXING_SEQUENCE_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_AND_MORPHOLOGY/links/54e791d00cf25ba91c797809.pdf](https://www.researchgate.net/publication/30267559243_RHEOL_BEHAVIOR_OF_PA6PEGAALDPE_BLEND_AND_THE_EFFECTOF_THE_MIXING_SEQUENCE_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_AND_MORPHOLOGY/links/54e791d00cf25ba91c797809.pdf).

- [35] Y. Zhanhai, Y. Zhihui, S. Guoen, L. Chaozhong, T. Jin, R. Luquan and Y. Jinghua. "Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MAH as a Compatibilizing Agent." **Journal of Applied Polymer Science** 75(2) (2002) 232-238.
- [36] A. Pankaj, W.B. Andre, M. Edcleide and J.A. Tomas. "Influence of Reactive Compatibilizers on the Rheometrical and Mechanical Properties of PA6/LDPE and PA6/HDPE Blends." **Journal of Materials Science**. 45(2) (2010) 496.
- [37] M.B. Douglas. "**Plastic Injection Molding : Manufacturing Process Fundamentals.**" Dearborn: Society of Manufacturing Engineers. 1996.
- [38] อธิพิณ แจ่มชัด, ชลลดา อุตวิรุฬห์, จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร, สุภารัตน์ รักชลธิ และสมศักดิ์ วรรณกมลชัย. "ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์." กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [39] Polyplastics Co., Ltd. "**Polyplastics Solution Platform for Engineering Plastics.**" 2001. [Online]. Available : <http://www.xcentricmold.com/aboutinjectmold.php>.
- [40] X. Chen, J. Shi, L. Wang, H. Shi, Y. Liu, and L. Wang. "Isothermal Crystallization Kinetics and Melting Behavior of Modified High-Density Polyethylene/Barium Sulfate Nanocomposites." **Polymer Composites** 32(2) (2010) 177-184.
- [41] K. Wang, J. Wu and H. Zeng. "Radial Growth Rate of Spherulites in Polypropylene Barium Sulfate Composites." **European Polymer Journal** 39 (2003) 1647-1652.
- [42] American Standard for Testing and Materials. "**Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.**" ASTM D792-08. Annual Book of ASTM Standards 08.01. 2007.
- [43] Mettler-Toledo, LLC. "**Density Kit for Solids and Liquids Determination.**" 2010. [Online]. Available : [http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/_jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_\(OP- EN\).pdf](http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/_jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instructions_Density%20Kit_(OP- EN).pdf).
- [44] American Standard for Testing and Materials. "**Standards Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry.**" ASTM D1131. Annual Book of ASTM Standards 14(02). 1992.

- [45] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.”** ASTM E794. Annual Book of ASTM Standards 4.02. 2006.
- [46] F.W. Billmeyer. **“Text book of Polymer Science.”** New York: John Wiley & Sons. 1984.
- [47] American Standard for Testing and Materials. **“Standards Test Method for Tensile Properties of Plastics.”** ASTM D638. Annual Book of ASTM Standards 8.02. 1992.
- [48] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Impact Resistance for Plastics and Electrical Insulating Material.”** ASTM D256. Annual Book of ASTM Standards 8.03. 1992.
- [49] American Standard for Testing and Materials. **“Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.”** ASTM D2240. Annual Book of ASTM Standards 8.02. 1992.
- [50] A. Lustiger and R.D. Corneliussen. “The Role of Crazes in the Crack Growth of Polyethylene.” **Journal of Materials Science** 22 (1987) 2470-2476.
- [51] V. Shah. **“Handbook of Plastic Testing Technology.”** 2nd ed. New York: John Wiley & Sons. 1998.
- [52] H.H. Adler and P.F. Kerr. “Variations in Infrared Spectra, Molecular Symmetry, and Site Symmetry of Sulfate Minerals.” **American Mineralogist** 50 (1965) 132-147.
- [53] J. Manam and S. Das. “Thermally Stimulated Luminescence Studies of Undoped, Cu and Mn Doped BaSO₄ Compounds.” **Indian Journal of Pure and Applied Physics** 47(6) (2009) 435-438.
- [54] S. Paul. **“Surface Coatings : Science & Technology.”** 2nd ed. Michigan: John Wiley & Sons. 1996.

ภาคผนวก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกการจ่ายรับ-จ่ายเงิน โครงการวิจัย สัญญาเลขที่ 2559-0105031 ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2559

แหล่งทุน: เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์
โครงการ: การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นด้วยแบบเรียงซัลเฟต
หัวหน้าโครงการ: นางสุภารัตน์ รักขสิทธิ์

ว/ด/ป	รายการ	เลขที่อ้างอิง	รายการรับ - จ่าย		คงเหลือ	รายรับ	รายจ่าย					รวม รายจ่าย	
			รับ	จ่าย			งบบุคลากร ค่าจ้างชั่วคราว	ค่าตอบแทน	ค่าใช้สอย	ค่าวัสดุ	ค่าสาธารณูปโภค		งบลงทุน ค่าครุภัณฑ์
	งบประมาณที่ได้รับการอนุมัติ (ตามแผน)		42,500.00										
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 1 = 85%)		7,500.00										
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 2 = 15%)												
	จำนวนเงินที่ได้รับ (งวดที่ 3)												
	หัก ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 1)			13,879.00			3,000.00		7,280.00		3,599.00		13,879.00
	ค่าใช้จ่าย (ครั้งที่ 2)			36,121.00			11,000.00		19,240.00		5,881.00		36,121.00
	งบประมาณคงเหลือ		50,000.00		0.00	0.00							
	รายละเอียดค่าใช้จ่าย												
ครั้งที่ 1													
11 พ.ย. 58	ค่า DSC	เล่มที่ 1620 เลขที่ 23							2,010.00				2,010.00
12 พ.ย. 58	ค่าวัสดุ	เล่มที่ 70 เลขที่ 12									200.00		200.00
16 ม.ค. 59	ค่าวัสดุ Logitech Cordless Presenter R800	94,791.00							210.00		2,690.00		2,690.00
19 ม.ค. 59	ค่า CTA	เล่มที่ 1625 เลขที่ 4							3,000.00				3,000.00
20 ม.ค. 59	ค่า DSC	400559/59							760.00				760.00
29 ม.ค. 59	ค่า CTA	เล่มที่ 1627 เลขที่ 3							1,300.00				1,300.00
23 ก.พ. 59	ค่า SEM	เล่มที่ 1679 เลขที่ 9									280.00		280.00
24 ก.พ. 59	ค่าวัสดุ แผ่นใส	3,716.00									429.00		429.00
2 มี.ค. 59	ค่าวัสดุ กรรไกร แผ่นใส	103-000566							3,000.00				3,000.00
15 มี.ค. 59	ค่ารวบรวมข้อมูล ครั้งที่ 1	ไม่มี							3,000.00				3,000.00
	รวมครั้งที่ 1								7,280.00		3,599.00		13,879.00

ประวัตินักวิจัย

ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ. (เกียรตินิยม)	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2535
MSc	Polymer Science and Technology	Loughborough University	พ.ศ. 2537
PhD	Polymer Rheology	Loughborough University	พ.ศ. 2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
พ.ศ. 2536-2541	ทุนเรียนปริญญาโท-เอก ณ สหราชอาณาจักร	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2543	ทุนวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมขนาดเล็ก	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
พ.ศ. 2547	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555-2557	ทุนวิจัยบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Understanding Elongational Flow Properties of Filled Polymer Melts for Plastics Blow Molding, *Food, Cosmetics and Drug Packaging*, 21(11), 213, 1998.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Extensional Flow Characterization and Extrusion Blow Molding of High Density Polyethylene Modified by Calcium Carbonate, *Plastics Rubber and Composites*, 28(8), 363, 1999.
3. Haworth, B. and Jumpa, S., Melt-State Elongational Rheometry of Mineral-Filled Polyethylene, *Polymer Testing*, 19(4), 459, 2000.
4. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ธนเรศ ประเสริฐวงศ์ และธราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, 9(4), 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักชลธิ์ กังสาดล บัวบุตรา ณัฐนิชาร์ ศิริเจียรนัย และกัญญาวิรี สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 30(4), 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ประมินทร์ ช่างเพชร และประกฤษณ์ แสงทองอินทัย, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(1), 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักชลธิ์ พงษ์ธร แซ่ฮุย ธีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุดิ, ผลของแก้วเกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 12(2), 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักชลธิ์ ธีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของแก้วเกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. 12(3), 50, 2547.
9. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Limpong, P., Properties of Calcium Carbonate- Filled Polyethylene Bottles Produced from Extrusion Blow Molding Process, *KMITL Science Journal*, 6(2b), 582, 2006.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, 51(7), 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17th–18th September 1996, Loughborough, UK.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Processing Behavior of Filled HDPE for Blow Molding, Advances in Blow Molding: New Materials and Processes, 30th June – 1st July 1998, Loughborough, UK
3. Haworth, B., Jumpa, S., and Miller, N.A., Proceeding International Conference “PPS-15”, S’Hertogenbosch, The Netherlands, 1999, Polymer Processing Society, Paper 132.
4. Jumpa, S and Haworth, B., Extrusion Blow Moulding of CaCO₃-Filled HDPE Compounds, PPS Symposium, Thailand, P-50, 1999.
5. Jangchud, I. and Rukchonlatee, S., Porous Water Pipe made from Ground Rubber Tire (GRT) and High Density Polyethylene (HDPE): Rheology and Water Irrigation, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 120, 2003.
6. Rukchonlatee, S., Water Vapor Permeability, Rheological and Mechanical Properties of Zeolite NaA –filled Linear Low Density Polyethylene, *The 8th Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 134, 2003.
7. Ochaikul, D., Rukchonlatee, S., Soisant, P., Aramruang, S., and Fapratanchai, T., Paper Production and Properties from Bacterial Cellulose *Acetobacter xylinum* TISTR 967, *The 1st KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระพี เจริญสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุพห์ และสุภารัตน์ รักขลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนตม์อริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักขลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุพห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHE 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธี นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
12. Moungrmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
13. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
14. Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
15. Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
16. Moungrmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
17. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO₃-Filled HDPE Bottles, *The 7th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.
18. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี, फिल्मพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.

19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, *The 38th Congress on Science and Technology of Thailand (STT38)*, October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, *The Proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013)*, January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.
21. Chitranuwatkul, J., Ochaikul, D., Rukchonlatee, S. and Janvikul, W., Studied on Preparation and Antibacterial Activity of Zinc Oxide/Cellulose Composite Films, *International Conference on Engineering, Applied Science and Technology 2013 (ICEAST 2013)*, August 21-24, The Sukosol, Bangkok, Thailand, 2013.
22. Rukchonlatee, S., Napradit, S., Manusongtanakul, P., Juntima, S and Sooknoi, T., Effect of LLDPE/LDPE Ratio on Processability and Properties of LLDPE/LDPE/EVA Films, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID100, pp.114-115, 2013.
23. Pinsakul, S., Rukchonlatee, S., Monvisade, P. and Chaiyanit, V., Modified Plastisol Inks Based on Ethylene Vinyl Acetate and Ethylene Methyl Acrylate Copolymers, *2013 International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2013)*, November 20-21, IVE/VTC, Tsing Yi, Hong Kong, China, ID71, pp.73-74, 2013.
24. Sirichantanan, T., Sooknoi, T., Yamaguchi, M. and Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LDPE Film with EMA as Dispersed Phase, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 169-172, 2014.
25. Pinsakul, S., Monvisade, P., Rukchonlatee, S. and Chaiyanit, V., Potential Use of Modified Plastisol Inks Based on EVA/EVOH, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 174-177, 2014.
26. Uttasuradee, M., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of LDPE Films using EVOH or EVA Blends, *The Proceeding MACRO 2014 (2014 IUPAC World Polymer Congress)*, July 6 – 11, Chiang Mai International Convention and Exhibition Center (CMICE), Chiang Mai, Thailand, pp. 215-217, 2014.

27. Uttasuradee, M. and Rukchonlatee, S., Property Improvement of Linear Low Density Polyethylene/ Barium Sulfate Composites for Sea Fishery Application, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 416-419, 2015.
28. Sahassanon, T. Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Ritvirulh, C., Improvement of Ethylene Permeation in LLDPE/SEBS Film with Zeolite Y, *The Proceedings of Pure and Applied Chemistry International Conference 2015 (PACCON 2015)*, January 21-23, Bangkok, Thailand, pp. 432-435, 2015.

บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. สุภารัตน์ จำปา, “เครื่อง Uniaxial Elongational Rheometer สำหรับศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*, 10(1), 8, 2543.

งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบู๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุขน้อย อิทธิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ เคมีหลักสูตรแห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบู๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) *สาระ...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด* 2549.
2. อิทธิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ สุภารัตน์ จำปา ประจักษ์วารากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรรณมงคลชัย *ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. จำนวน 77 หน้า 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้